

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKRODALGA ISITMA SİSTEMLERİNDE YARIK
ANTEN TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Hakkı Yavuz AKAGÜN**

Anabilim Dalı : ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

ARALIK 2006

**MİKRODALGA ISITMA SİSTEMLERİNDE YARIK
ANTEN TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hakkı Yavuz AKAGÜN
504011262**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Aralık 2006**

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Selçuk PAKER

Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Cevdet IŞIK

Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ

ARALIK 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın temel amacı mikrodalga fırın için yarık anten tasarımıdır. Örnek uygulama olarak bir mikrodalga fırının bilgisayar benzetimi ile tasarımı yapılmıştır. Böylelikle Ar-Ge ve üretim aşamasında yanlış modellemeden kaynaklanabilecek fazla harcamaların azalmasına yardımcı olunması düşünülmüştür.

Bu çalışmada HFSS (High Frequency Structure Simulator) programının 9.1 versiyonu ile hesaplamalar yapılmış ve kaynaklar bölümünde belirtilen konferans bildirilerinde elde edilmiş olan sonuçlarla bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tüm bu çalışmalarımnda bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen başta danışmanım Doç. Dr. Selçuk PAKER olmak üzere, Özcan KALENDERLİ'ye ve Doç. Dr. Cevdet IŞIK'a değerli eleştiri ve önerileri için çok teşekkür ederim.

Aynı zamanda bu çalışmada elde edilen sonuçların benzer konuları araştıran araştırmacılara ve mikrodalga fırın üretimi yapan firmalara yararlı olacağı düşüncesindeyim.

Son olarak, çalışmalarımnda beni teşvik eden ve her türlü olanağı sağlayan aileme ve nişanlıma teşekkürlerimi bildirmek istiyorum.

Aralık, 2006

Hakkı Yavuz AKAGÜN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. MİKRODALGA ISITMA SİSTEMLERİ	3
2.1. Mikrodalga Isıtma	3
2.2. Mikrodalga Isıtma Sistemleri	3
2.3. Mikrodalga İşlemleri	6
3. MİKRODALGA KAYNAĞININ İNCELENMESİ ve MİKRODALGA FIRINLAR	8
3.1. Magnetron Kaynağının İncelenmesi	8
3.2. Mikrodalga Fırınları	9
4. REZONATÖR ve DALGA KILAVUZU	14
4.1. Giriş	14
4.2. Transmisyon Boruları Üzerine Açılan Yarıklar ve Işıma Özellikleri	14
4.3. Transmisyon Borusunun Geniş Yüzeyi Üzerine Açılan Yarıklar	17
5. BİLGİSAYAR BENZETİM YAZILIMIYLA MİKRODALGA FIRIN TASARIMI	21
5.1. Bilgisayar Programı	21
5.2. Dalga Kılavuzu Tasarımı	23
5.3. Rezonatörün Tasarımı	29
SONUÇLAR ve TARTIŞMA	35
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	39

KISALTMALAR

MD	: Mikrodalga
DC	: Doğru akım
TM	: Manyetik alana dik mod
TE	: Elektrik alana dik mod
w_x	: Dalga kılavuzundaki yarığın eni
w_y	: Dalga kılavuzundaki yarığın boyu
s_{vs}	: İki yarık arası eksen den eksene uzaklık
h_s	: Yarık anten dizisi ile dalga kılavuzunun sonu arasındaki mesafe
offset	: Dalga kılavuzunun merkezinden yarığın merkezine olan mesafe
HFSS	: Yüksek frekans yapı benzetim paket yazılım programı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1 : Dalga kılavuzu tasarımında en iyi giriş yansıma katsayısını veren değerler ve bu değerlerin değişiminin -10 dB deki band genişliği ve giriş yansıma katsayısına etkileri.....	26

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Tipik bir mikrodalga fırını.....	2
Şekil 2.2	: Mikrodalga ile malzeme arasındaki temel etkileşimler.....	3
Şekil 2.3	: Geleneksel yöntem ile ve mikrodalga yöntemi ile sinterleme ve aralarındaki farklılıklar.....	6
Şekil 3.1	: Magnetronun silindirik yapısı	7
Şekil 3.2	: Magnetron kaynağının elektrik besleme düzeneği	8
Şekil 3.3	: Kayan bant şeklindeki malzemenin kurutulmasına örnek.....	9
Şekil 3.4	: İnce levha halindeki uygulama.....	9
Şekil 3.5	: Yarık şeklindeki sisteme örnek	10
Şekil 3.6	: Çok modlu tipe uygulama örneği	10
Şekil 3.7	: Tünel şeklindeki fırınlara örnek	11
Şekil 3.8	: Tek modlu (TM ₀₁₀) bir rezonatörün uygulaması.....	11
Şekil 4.1	: Dikdörtgen Transmisyon Borusu	16
Şekil 4.2	: TE ₁₀ Modunda Dikdörtgen Transmisyon Borusunda Alan ve Akım Dağılımı	16
Şekil 4.3	: Transmisyon Borusunun Geniş Yüzeyine açılmış a) Boyuna, b) Enine ve c) Eğimli Yarıklar ve Eşdeğer Devreleri... 17	
Şekil 5.1	: HFSS programının açılış görüntüsü.....	22
Şekil 5.2	: HFSS programı ile elde edilen, dalga kılavuzu ve rezonatörün içinde oluşan elektrik alan dağılımının görüntüsü.....	23
Şekil 5.3	: HFSS programı aracılığı ile oluşturulan dalga kılavuzundaki yarıkların yapısı ve parametrelerin gösterimi.....	24
Şekil 5.4	: hs değişkeninin değişimiyle kaynağa geri dönen gücün ilişkisi	25
Şekil 5.5	: svx değişkeninin değişimiyle kaynağa geri dönen gücün ilişkisi ...	27
Şekil 5.6	: wx değişkeninin değişimiyle kaynağa geri dönen gücün ilişkisi ...	27
Şekil 5.7	: wy değişkeninin değişimiyle kaynağa geri dönen gücün ilişkisi ...	28
Şekil 5.8	: Ofset değişkeninin değişimiyle kaynağa geri dönen gücün ilişkisi	28
Şekil 5.9	: Giriş yansımaya katsayısını en az yapan değişkenler ile hazırlanan dalga kılavuzunun giriş yansımaya katsayısının grafiği.....	29
Şekil 5.10	: HFSS programında dalga kılavuzunun altına yerleştirilmiş rezonatörün görüntüsü.....	29
Şekil 5.11	: Rezonatör'ün içindeki yük 10 cm x 10 cm x 2 cm boyutlarında iken giriş yansımaya katsayısının frekans ile değişim grafiği	32
Şekil 5.12	: Rezonatör'ün içindeki yük 15 cm x 15 cm x 2 cm boyutlarında iken giriş yansımaya katsayısının frekans ile değişim grafiği	33
Şekil 5.13	: Rezonatör'ün içindeki yük 20 cm x 20 cm x 2 cm boyutlarında iken giriş yansımaya katsayısının frekans ile değişim grafiği	33

SEMBOL LİSTESİ

ϵ	: Dielektrik katsayısı
ϵ_r	: Bağıl dielektrik sabiti
μ	: Manyetik geçirgenlik
σ	: Elektriksel iletkenlik
β	: Faz sabiti
E	: Elektrik alan vektörü
H	: Manyetik alan vektörü
a	: Dalga kılavuzunun uzun kenar uzunluğu
b	: Dalga kılavuzunun kısa kenar uzunluğu
L	: Dalga kılavuzunun uzunluğu

MİKRODALGA ISITMA SİSTEMLERİNDE YARIK ANTEN TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada, mikrodalga ısıtma sistemlerinde kullanılmak üzere bir yarık anten tasarımının gerçekleştirme yöntemi açıklanmış ve sayısal benzetim yöntemiyle bulunan sonuçlar verilmiştir. Endüstriyel olarak ucuz ve çok miktarda üretilen magnetron kaynaklarının temel çalışma frekansı olan 2.45 GHz'de çalışan bir mikrodalga fırını besleyen dalga kılavuzu, ardından dalga kılavuzuna uygun rezonatör tasarlanmıştır. Tasarım bilgisayar benzetim yazılımlarından HFSS (High Frequency Structure Simulator) programı ile yapılmıştır. HFSS'in seçilme nedeni yüksek performanslı olması, kolay anlaşılabilir bir ara yüze sahip bulunması ve gerçek hayatta yapılan uygulamalara çok yakın sonuçlar verebilmesinden kaynaklanmaktadır. Tasarlanan mikrodalga fırının dalga kılavuzu dört yarıklıdır. Rezonatör kısmı ise standart bir ev tipi fırın boyutlarındadır.

Tasarım aşamasında, dalga kılavuzunun yarık eni, yarık boyu, yarık dizisinin dalga kılavuzu sonundan uzaklığı, yarığın ortasından dalga kılavuzunun ortasına kadar olan mesafe, yarıklar arası uzaklık gibi parametreler giriş yansıma katsayısını en küçük yapacak şekilde hesaplanmıştır. Ayrıca, benzetim sonucu elde edilen bu parametrelerin kaynaklarda önerilen değerler ile karşılaştırılmaları da tez içerisinde verilmiştir.

Daha sonra hem rezonatörün en, boy ve yüksekliği, rezonans frekansı olarak 2.45 GHz'i verecek şekilde, hem de enerji dalga kılavuzunun yarıklarından çıkarak rezonatörün içerisine girebilecek şekilde rezonatörün boyutları belirlenmiştir. Tüm bunlar yapılırken rezonatör içerisinde oluşacak modların olabildiğince küçük olmasına çalışılmıştır.

Sonuç olarak, bütünleşmiş sistemin başarımının izlenmesi için rezonatör içerisine çeşitli boyutlarda yük konularak daha önceden elde edilmiş değişkenlere göre giriş yansıma katsayısı tekrar hesaplanarak fırının çalışmasının başarım benzetimi yapılmış ve dalga kılavuzundan yüke enerji aktığı görülmüştür.

Sonuç olarak elde edilen giriş yansıma katsayıları kaynaklarda belirtilen benzer çalışmalarla uygunluk göstermektedir.

SLOT ANTENNA DESIGN IN MICROWAVE HEATING SYSTEMS

SUMMARY

In this study, the implementation of a slot antenna is described for microwave heating systems. The results are that were found by using the Simulator program is also demonstrated. The waveguide is fed by a magnetron at 2.45 GHz. This type of magnetron is widely used in industry. It is also produces generally and does not cost much.

After the design of waveguide, the resonator is being designed in order to match the waveguide. The simulation is being done by the software called HFSS (High Frequency Structure Simulator). The reason to choose this software is the high performance and its ability to give very close results to the experiments that are done in electronic laboratories. HFSS has also a very user friendly interface.

During the design period, the variables like; slot length, slot width, offset value, headspace, slot vertical spacing are altered one by one to get the smallest reflection coefficient.

Additionally, the results of the simulation are benchmarked by the theoretical values that are suggested in literature. Some of them may be found in the index of this thesis.

The resonator is designed by taking into consideration of its dimensions to give the resonance Frequency and to let the energy penetrate from waveguide to resonator. All these are accomplished by using the possible minimum modes.

As a result, in order to analyze the efficiency of both waveguide and resonator together, a load is inserted into the resonator. The input reflection coefficient is again calculated. It is seen that the energy penetrates into the load.

The input reflection coefficient is consistent with the experiments that are done in literature. The further information can be found in the index section.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada mikrodalga ısıtma sistemlerinde yarık anten tasarımı üzerinde durulmuş ve bilgisayar ortamında bir uygulama yapılmıştır. Mikrodalga ısıtma sistemi olarak mikrodalga fırın ve onu besleyen yarık anten olarak dört yarıkli bir anten tasarlanmıştır.

Gerekli teorik bilgiler verildikten sonra bilgisayar benzetim yazılımlarında Ansoft firmasının HFSS (High Frequency Structure Simulator) v9.1 ile önce dalga kılavuzunun tek başına daha sonra dalga kılavuzu ve rezonatör beraberken benzetimleri yapılmıştır. Yarıklardan en fazla enerjinin çıkabilmesi için yarıkların eni, yarıkların boyu, yarık dizisinin sonunun dalga kılavuzunun kısa devre ucundan uzaklığı, yarığın boyuna uzaklığının orta noktasından dalga kılavuzunun orta noktasına uzaklığı ve ardışık yarıkların merkezleri arasındaki uzaklık değişken olarak alınmıştır. Benzetim yapılırken yukarıda belirtilen beş adet değişkenin her biri diğer değişkenler sabit tutularak, dalga kılavuzunun giriş yansıma katsayısı en küçük değeri verecek şekilde değiştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda giriş yansıma katsayısının -48 dB değerine ulaşılmıştır. Daha sonra ev kullanımı için uygun ölçülerde bir rezonatör tasarlanmış ve dalga kılavuzuna uydurulmuştur. Rezonatör tasarımı, rezonatör boyutlarının rezonans frekansını vermesi ve rezonatör içerisinde oluşacak modun mümkün olduğunca küçük olması gibi önkoşullar göz önünde bulundurulmuştur.

Bu sisteme enerji verildiğinde, enerjinin yüke kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Çalışan sistem için -10 dB nin altında sonuçlar alınmıştır. Bu koşullarda band genişliği 40 MHz civarında olmaktadır.

Mikrodalga fırının patenti ilk olarak 1945 yılında Raytheon isimli bir Amerikan firması tarafından alınmış ve ilk mikrodalga fırın 1947 yılında üretilmiştir. En çok satan ilk ev tipi mikrodalga fırın 1965 yılında aynı firma tarafından üretilmiştir. 1970'lerin sonlarına doğru mikrodalga teknolojinin ilerlemesi, fiyatların düşmesine neden olmuştur. Şu anda Amerika'daki evlerin % 95'inde mikrodalga fırın

kullanılmaktadır. Günümüzde Glanz isimli Çin markası dünya pazarının yüzde kırkını elinde bulundurmaktadır.

Literatürde dalga kılavuzu üzerine açılan yarıklar teorisinin temelleri A.F. Stevenson tarafından 1948 yılında atılmıştır. Bu günde kadar konuyla ilgili birçok kitap ve makale yazılmış olup teorik olarak yarık anten tasarımı için elde edilen değerler ile bu çalışmada bulunan değerler birbirine yakın olup çalışılan frekansa göre değişiklik göstermektedir. B. Yee (1995) ve V. V. Yakovlev (2001)'in çalışmaları bu teze kaynak oluşturmuştur. Bu tezde ulaşılan giriş yansıma katsayısının (-15dB) V. V. Yakovlev (2001)'in sonuçlarıyla (-5dB) karşılaştırıldığında daha iyi olduğu gözükmektedir.

2. MİKRODALGA ISITMA SİSTEMLERİ

Bu bölümde, mikrodalga fırın tasarımı için gerekli olan mikrodalga ısıtma, ısıtma sistemleri ve ısıtma işlemleri hakkında temel bilgiler verilecektir.

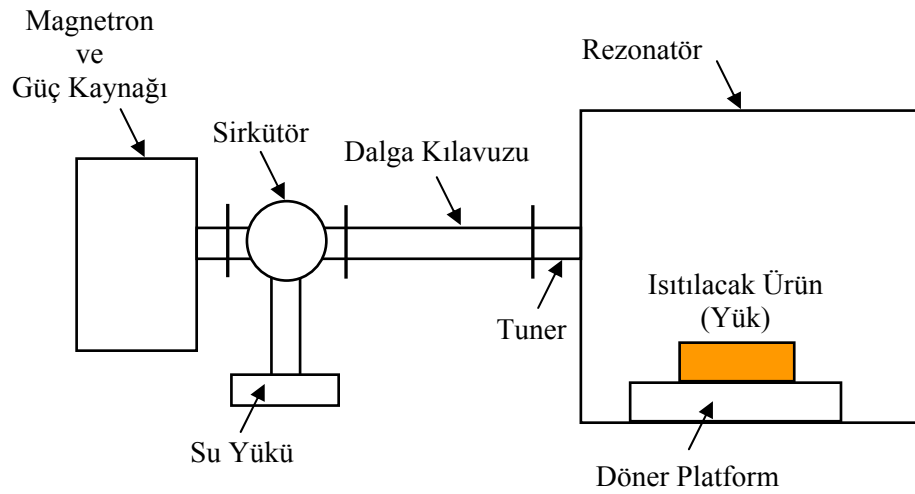
2.1. Mikrodalga ısıtma

Mikrodalga (MD) sistemlerinde ısıtma, enerji emen dielektrik bir yalıtkanda meydana gelir. MD radyasyonu, elektromanyetik spektrumda radyo frekansı ile komşudur. Bununla beraber aralarındaki ayırım net değildir. Örneğin 900 MHz civarındaki dalgalar, bazı uygulamalarda RF (cep telefonu) bazı uygulamalarda da MD (dielektrik ısıtma) dalgaları olarak kabul edilirler.

2.2. Mikrodalga ısıtma sistemleri

MD ısıtma sistemleri genel olarak dört ana bölümden oluşur:

1. Güç kaynağı,
2. Güç dönüşüm ortamı,
3. Düzenleyici sistem,
4. Uygulayıcı.



Şekil 2.1 : Tipik bir mikrodalga fırın

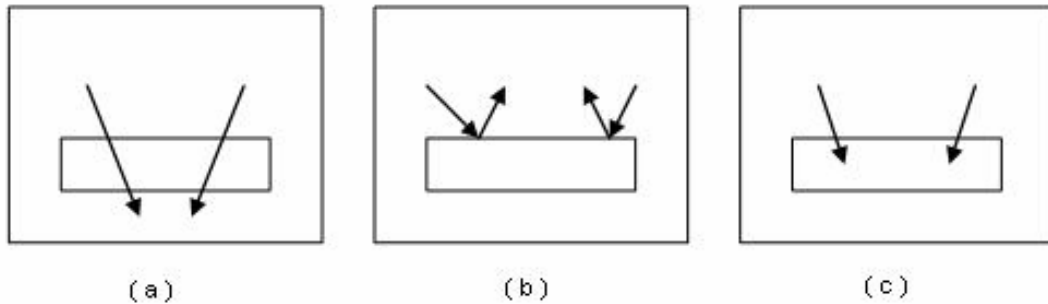
Cihazın güç kaynağı genelde bir magnetrondur. 500 W – 2 kW arasında (maksimum 6-15 kW'a ulaşabilen) çıkış gücüne sahip 2,456 GHz magnetronlar genelde uygundur. Bir magnetron tarafından üretilen güç, yük durumundan yaklaşık olarak bağımsızdır.

Magnetron, gücü tüm sisteme yayan bir anten veya saçıcı açıklığını uyarır. Anten, dalgaları MD uygulayıcıya yönlendiren dalga rehberleri boyunca hareket eder. Bazı uygulamalarda dalga rehberlerinin kendileri uygulayıcılık görevi üstlenirler.

MD uygulayıcıların en yaygınları metal bir kutu ya da boşluktur. Isıtılacak malzemeler bu boşluğa yerleştirilir. Bu bölüme ısıtmayı her doğrultuya eşit miktarda olacak şekilde arttırmak için bazı değişiklikler yapılabilir.

Mikrodalgalar bir malzemeye doğru uygulandığında üç seçenek söz konusudur;

1. Malzeme, hava, kuvars camı gibi şeffafsa dalgaları geçirir,
2. Malzeme, grafit ve metaller gibi yansıtıcı ise dalgaların kendilerine cidar kalınlığından fazla nüfuz etmelerine izin vermezler ve onları boşluğa geri yansıtırlar.
3. Malzeme, yiyecekler, seramikler, yağ ağaçlar gibi enerjinin içerisine nüfuz etmesine imkan sağlayacak şekilde ise mikrodalga enerjisini emerler ve bunu ısıya çevirebilirler. Dalgaların madde içine ne kadar nüfuz edeceği ise malzemeye ve malzemenin dielektrik özelliklerine göre değişir. Çoklu sistemlerde en azından bir tane emici malzeme varsa sistem onu iyi ısıtılabilir.



Şekil 2.2 : Mikrodalga ile malzeme arasındaki temel etkileşimler:

- a) Şeffaf malzemeler dalgaları geçirmesi;
- b) Yansıtıcı malzemelerde dalgaların yansması;
- c) Mikrodalga enerjisinin emilmesi ve ısıya çevrilmesi.

MD ısıtmanın temel prensibi bir dielektrik malzemenin yüksek frekanslı elektrik alanı altına yerleştirilmesiyle enerji yutmasına dayanır. Malzemenin yuttuğu mikrodalga enerjisinin derecesi aşağıdaki formül ile açıklanabilir.

$$\epsilon = \epsilon_1 - j\epsilon_{11} = \epsilon_0 (\epsilon_{T1} - j\epsilon_{eff11}) \quad (1.1)$$

- ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti (F/m)
 ϵ_{T1} = Malzemenin bağıl dielektrik sabiti
 ϵ_{eff11} = Dielektrik kayıp faktörüdür.

Mikrodalgalar dielektrik bir malzemeye nüfus ettiklerinde ve ilerlediklerinde, serbest ya da bağlı yüklerin veya dönen dipollerin hareketine neden olan bir iç elektrik alanı oluştururlar. Malzeme içindeki harekete karşı gösterilen direnç, kayıplara sebep olur ve içsel, elastik ve sürtünme kuvvetleri nedeniyle elektrik alanı zayıflar. Sonuç olarak kütleli ısınma gözlenir.

Bu kayıplar aşağıdaki ifade ile gösterilirler:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_T} = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_T \epsilon_0} \quad (1.2)$$

- σ = Elektriksel iletkenlik (S/m)
 f = Frekans (Hz)
 ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti (F/m)
 ϵ_T = Malzemenin bağıl dielektrik sabiti
 ϵ_{eff} = Malzemenin dielektrik kayıp faktörüdür.

$\tan \delta$ aynı zamanda malzemenin emdiği enerjiyi ısıya çevirebilme yeteneğinin bir göstergesidir. Frekans nüfuz derinliği ile ilgilidir. Nüfuz derinliği, frekans ile ters orantılıdır. Isıtma miktarı, iç alan E'nin düşük olmasından dolayı hızlı bir şekilde artmayabilir.

Malzemenin birim hacmince emilen ortalama güç;

$$P = \int_v \sigma |E|^2 dv$$

σ = Elektriksel iletkenlik (S/m)
 E = Elektrik alan şiddeti (V/m) (1.3)

olarak verilebilir.

2.3. Mikrodalga İşlemleri

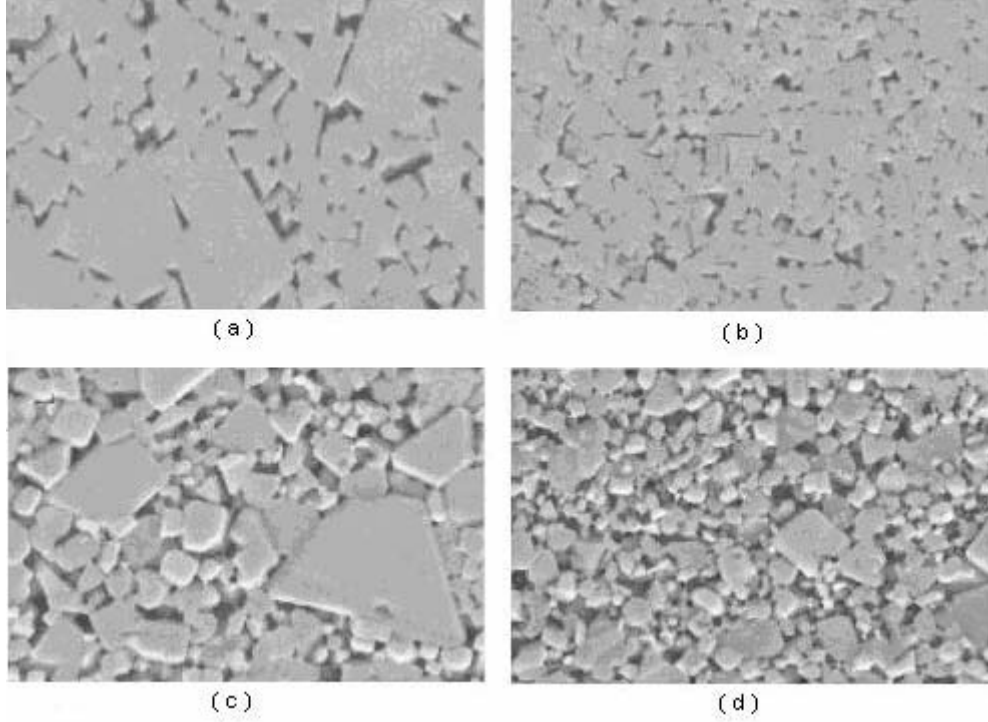
Mikrodalgaların malzeme sanayisinde kullanımı nispeten yeni bir olgudur. Mikrodalgalar malzeme sanayisinde kurutma, alçı döküm, organiklerin giderilmesi, kalsinasyon ve sinterleme süreçlerinde kendisine uygulama alanları bulmuştur.

Sistemin sahip olduğu potansiyelin farkına varılmasının ardından mikrodalga sinterleme üzerine geniş araştırmalar, özellikle mikrodalga yönteminin yetilerini belirlemek ve sanayi uygulamalarda kullanabilmek adına yapılmıştır.

Geleneksel ısıtma yönteminin aksine hacimsel bir ısıtma seçeneği sunan mikrodalga sinterlemenin ana avantajları;

1. 100°C/dakikadan daha da fazla ısıtma oranlarının uygulanabilmesi,
 2. Mikrodalga ile arttırılmış difüzyon işlemleri sebebiyle azalan sinterleme zamanı ve sıcaklıkları,
 3. Böylece önemli ölçüde kısalmış süreç zamanı ve düşük enerji tüketimi,
 4. Geliştirilmiş mikro yapılara ve malzeme özelliklerine ulaşılabilirlik,
 5. Sisteme hızlı müdahalelerin yapılabilirliği,
- olarak verilebilir.

Ayrıca, 2. maddede de söz edildiği gibi, sinterleme zamanı geleneksel yöntemlere göre çok daha düşüktür. Geleneksel yöntemlerde en az birkaç saat gereklidir. Çünkü sinterlenen bünyenin dışı ile içi arasında ısıl bir farklılık bulunur. Bu, özellikle malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı düşük malzemelerin sinterlenmesinde sorun oluşturur. Ek olarak böyle bir durum, olumsuz mikro yapısal sonuçlar doğuracağından özel bir malzeme için beklenen, başta mekanik olmak üzere özelliklerin elde edilmesinde sorunlara neden olur. Hızlı sinterleme sonucu taneler aşırı büyüyemezler ve geleneksel sinterlenmiş malzemelere göre daha ince taneli bir mikro yapı elde edilebilir. Aşağıdaki şekilde solda geleneksel yöntemler ile sinterlenmiş bir malzeme, sağda ise yine aynı malzemenin mikrodalga ile sinterlenmiş hali arasındaki fark görülüyor.



Şekil 2.3 : a) Geleneksel olarak sinterlenmiş ve parlatılmış; b) mikrodalga ile sinterlenmiş ve parlatılmış; c) Geleneksel olarak sinterlenmiş, parlatılmış ve asitlenmiş; d) Mikrodalga ile sinterlenmiş, parlatılmış ve asitlenmiş

Mikrodalga enerjisinin kullanım potansiyelinin azaltan en önemli sorun, düşük kayıp faktörüne sahip malzemelerin sinterleme zorluklarından çok, malzemenin emdiği enerjiyi tutmasıdır. Isıl kayıplar başlıca Stefan-Boltzman kanununa göre birincil olarak radyasyondur ve T ile değişir. Böylece sistem sıcaklığını arttırmak için gerekli olan güç miktarında önemli bir yükselme gerekli olur. Sorunun üstesinden gelmek için yansıtıcı gümüş aynalı duvar kullanımı gibi önlemler alınmaktadır.

Ayrıca ısıtmanın içten başlaması da bazen ciddi sorunlara, hatalara sebebiyet verebilir. Özellikle içte "sıcak nokta" adı verilen aşırı ısınan bölgelerin oluşması bölgesel ergimeler, bölgesel faz farklılıkları gibi beklenmeyen ve olumsuz sonuçlara yol açabilir.

Ek olarak bu kadar potansiyele sahip mikrodalga enerjisinin sanayi kullanımını sınırlayan etmenler arasında MD fırın üreticilerinin azlığı, sistemlerin pahalı oluşu da belirtilmelidir.

Her şeye rağmen mikrodalga sinterlemedeki sorunlar azaldıkça, çok önemli vaatler barındıran bu sistemin gelecekte şimdiki sistemlerin yerini başarı ile alacağı konusunda beklentiler büyüktür.

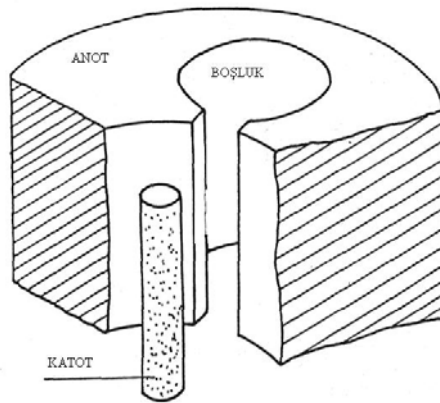
3. MİKRODALGA KAYNAĞININ İNCELENMESİ ve MİKRODALGA FIRINLAR

Bu bölümde mikrodalga fırınların ısıtma kaynağı olarak kullanılan magnetronlardan ve değişik boyutlara sahip cisimleri ısıtmak için kullanılacak fırınlardan bahsedilecektir. Uygulamada kullanılacak olan kaynak 2450 MHz'de çalışan bir magnetronudur.

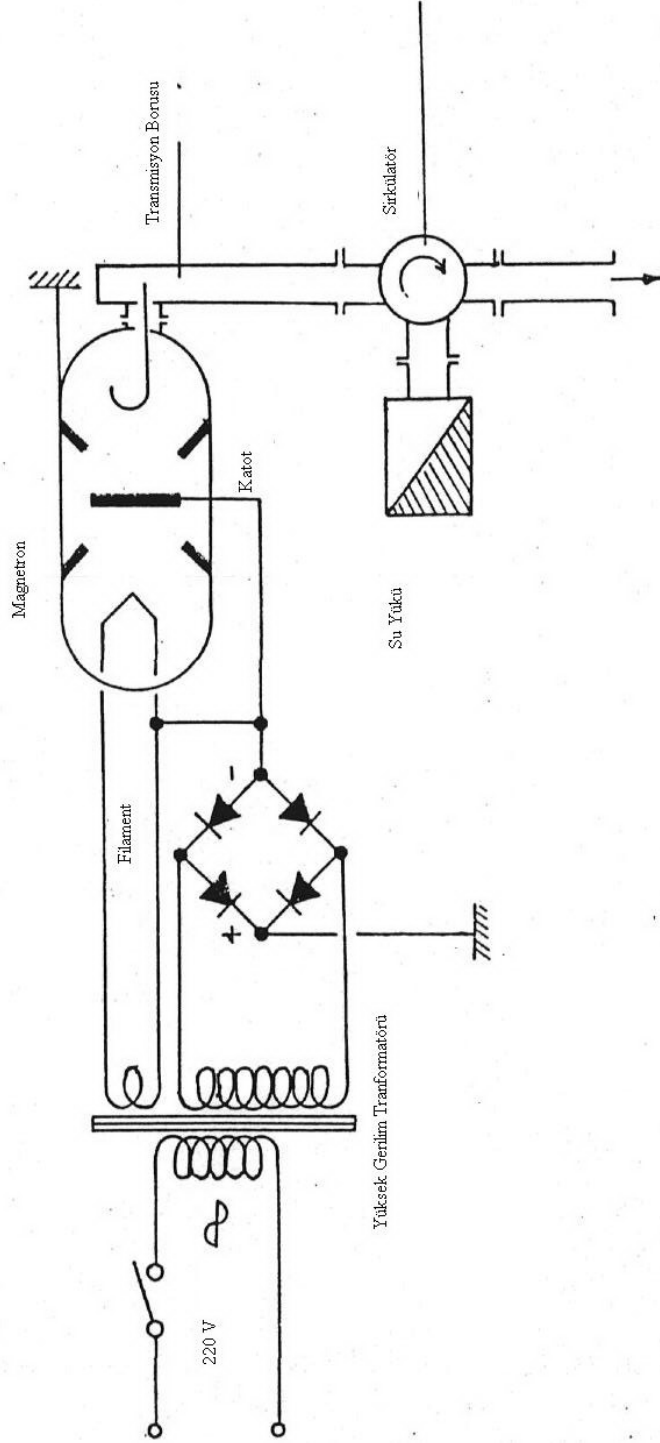
3.1. Magnetron Kaynağının İncelenmesi

Magnetron bakırdan yapılmış ve anot olarak bilinen bir temel bloktan oluşur. Bloğun ortasında bir delik açılmış ve bunun etrafında çok sayıda boşluk rezonatörleri vardır. Ortadaki boşluğa katot yerleştirilmiştir. Şekil 3.1'de bir magnetron kaynağının temel şeması verilmiştir. Magnetronun anodu toprak potansiyelindedir. Yüksek frekans çıkışı bir transmisyon borusuna kuple edilmiş bir anten vasıtası ile sağlanmıştır. Yansıyan enerji bir sirkülatör ile ayrılarak herhangi bir yükte harcanmaktadır. Bu şekilde magnetronun çalışmasının bozulması önlenmiş olur.

Magnetronun anodu katoduna göre 3000 V civarında bir DC potansiyeldedir. Bu şekilde radyal bir elektrik alan yaratılmaktadır. Ayrıca katot eksenine paralel yerleştirilmiş mıknatıslar vasıtası ile bir manyetik alan yaratılmaktadır. Katottan çıkan elektronlar bu şekilde çapraz iki alanın etkisinde hareket ederler. Şekil 3.1'de bir magnetronun silindirik yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Magnetronun silindirik yapısı

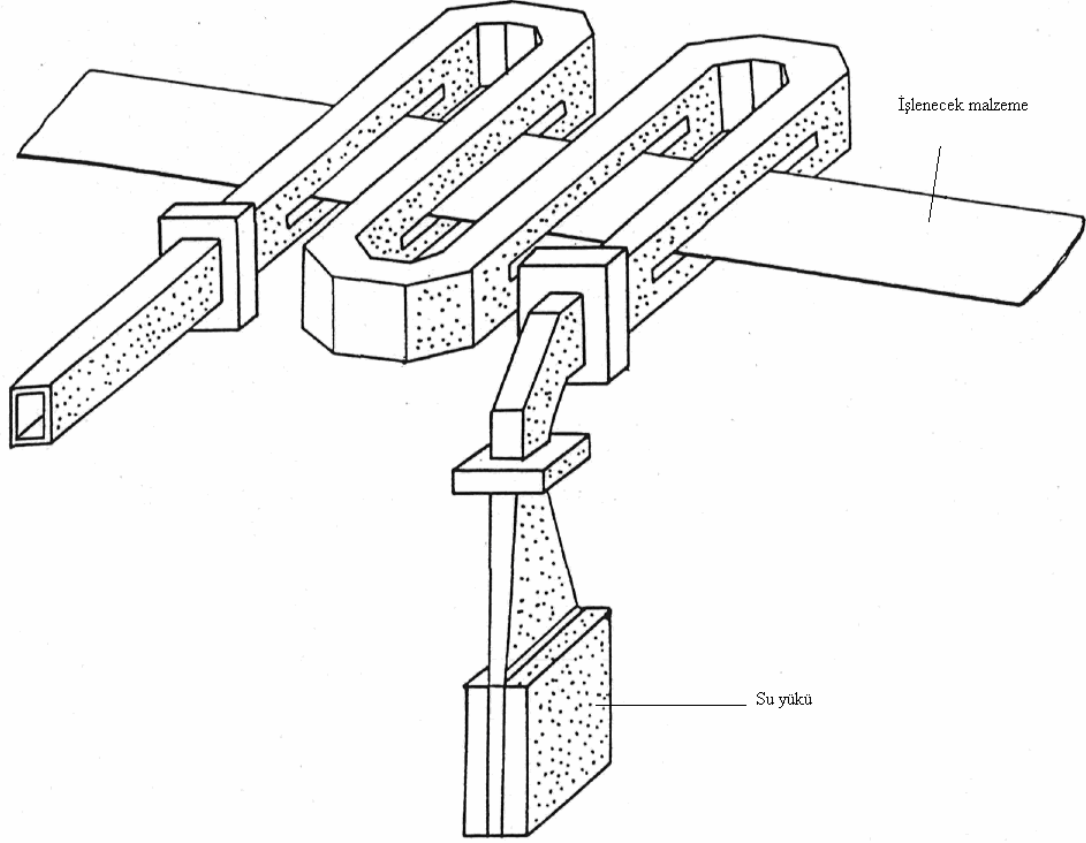


Şekil 3.2 : Magnetron kaynağının elektrik besleme devresi

3.2. Mikrodalga Fırınları

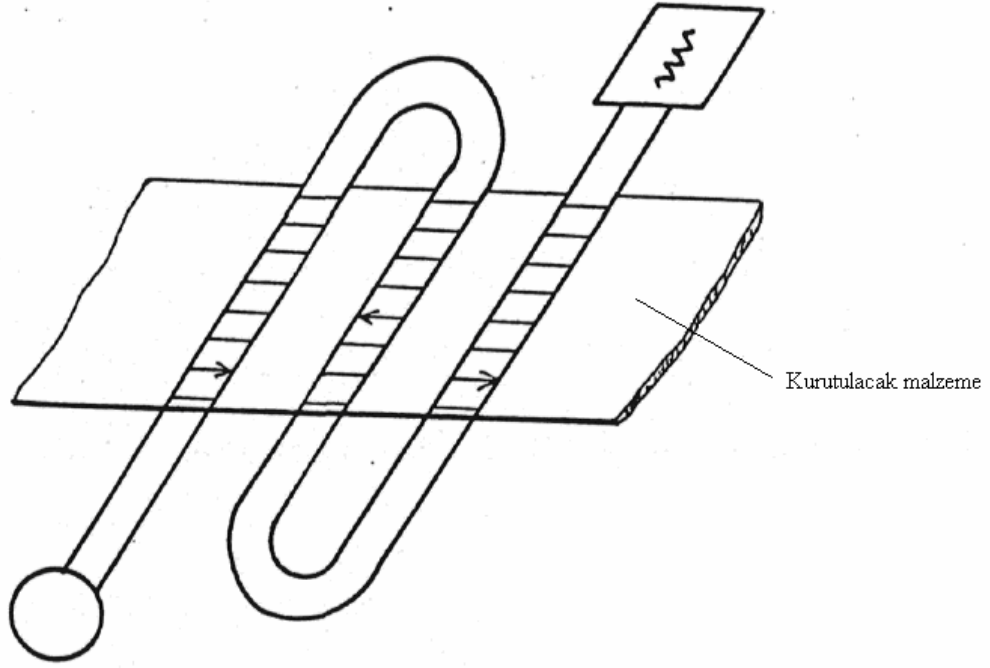
Bir yalıtkan malzemenin mikrodalgalar ile işlenmesinde mikrodalga fırınlarına ihtiyaç vardır. Mikrodalga fırınları ısıtılacak malzemenin boyutlarına göre çeşitli şekillerde olabilir.

Şekil 3.3'te olduğu gibi işlenecek malzeme kayan bir bant şeklinde sabit veya değişken hızla transmisyon boruları içinden geçirilerek mikrodalga enerjisi ile işleme tabi tutulabilir.



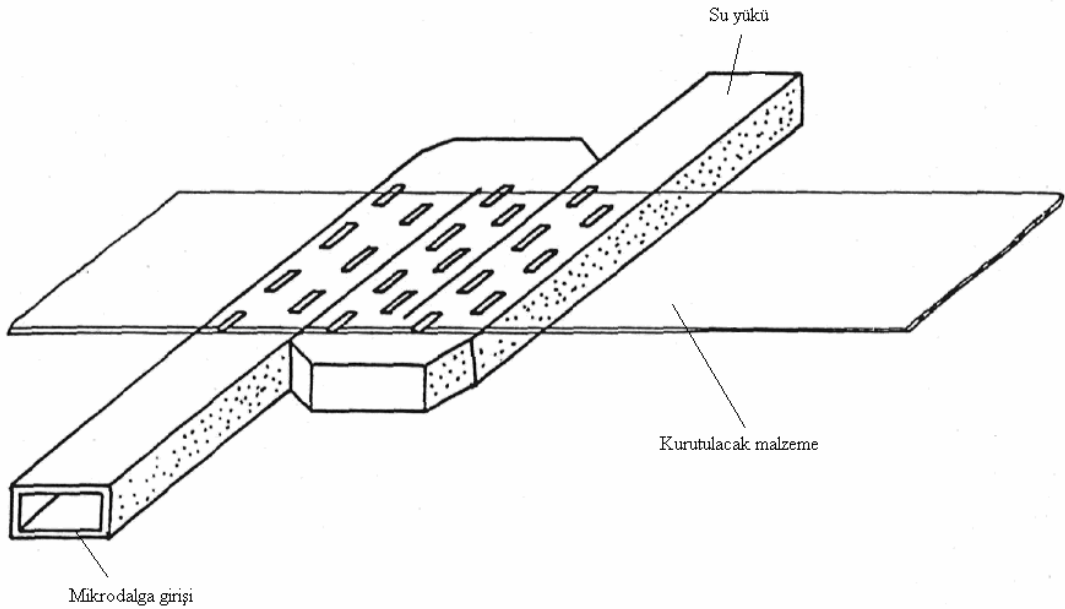
Şekil 3.3 : Kayan bant şeklindeki bir malzemenin kurutulmasında kullanılan fırına örnek

Bazı hallerde ince levha halindeki malzeme transmisyon borularının üzerinden veya içinden geçerek kurur. Böyle bir durum Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



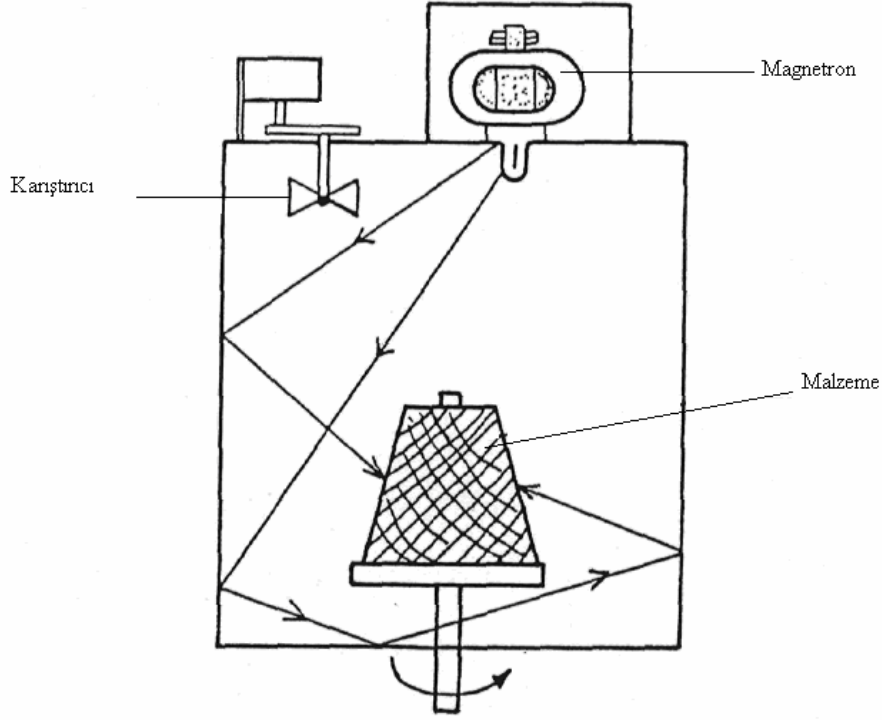
Şekil 3.4 : İnce levha şeklindeki bir malzemeyi kurutmak için kullanılan bir yapı

Burada mikrodalga enerjisi transmisyon hattı yardımı ile malzemeye nakledilmiştir. Yine bu şekildeki fırınlarla ilgili olarak transmisyon borusu üzerine küçük yarıklar açılarak mikrodalga enerjisinin malzemeyle teması sağlanır (Şekil 3.5).



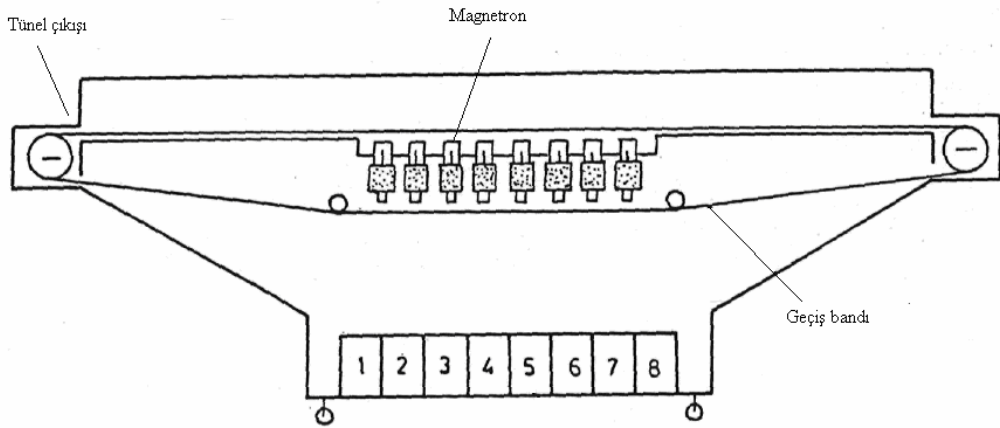
Şekil 3.5 : Üzerinde yarıklar bulunan fırına bir örnek

Şerit ve levha dışında hacimli malzemeler için modlu rezonatörler kullanılır. Böyle bir uygulama örneği Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



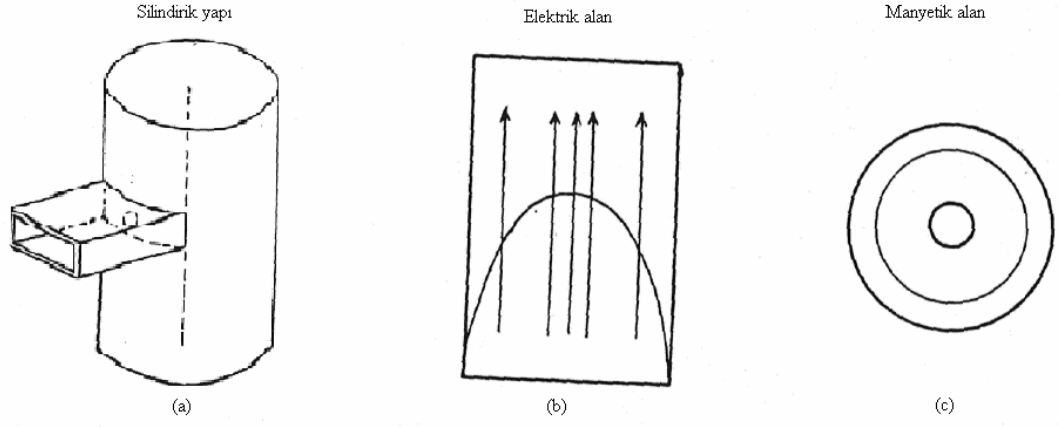
Şekil 3.6 : Çok modlu tipe uygulama örneği

Herhangi bir şekilde sahip olan bir malzeme için tünel şeklinde fırın uygulamaları da vardır.



Şekil 3.7 : Tünel şeklindeki fırına örnek.

İplik şeklindeki yalıtkan malzemeler için Şekil 3.8'de tek modlu (TM₀₁₀) bir rezonatör gösterilmiştir. Bu rezonatör bir transmisyon borusuyla kuple edilmiş ve alan dağılımı şekilde gösterilmiştir. Pratik olarak her malzeme için en uygun bir fırın şekli özel olarak incelenerek ortaya çıkar.



Şekil 3.8 : Tek modlu (TM_{010}) bir rezonatörün uygulaması. a) Silindirik yapı
rezonatörün görünüşü; b) Rezonatör içerisindeki elektrik alan; c) Rezonatör
içerisindeki manyetik alan

4. REZONATÖR VE DALGA KILAVUZU

4.1. Giriş

Transmisyon borusunun geniş yüzeyine açılan yarıklar, dikdörtgen biçiminde, eni boyuna göre çok dar olan ve boruyu uyaran alandan dolayı boru yüzeyinde oluşan akım çizgilerinin kesen açıklıklardır. Yarıkların pek çok alanda ışıma elemanı olarak uygulamaları mevcuttur.

Transmisyon borusu yüzeyine açılmış yarıklarla ilgili ilk çalışmalar 1946'da Watson ile başlamıştır. Bu tarihten günümüze kadar olan çok çeşitli çalışmalarda, yarık borudan dışarıya doğru bir mikrodalga gücü akışına sebep olduğundan ve boru içerisinde bir düzensizliğe sebep olduğundan transmisyon hat teorisinde bir empedansa karşılık geldiği kabul edilmiş ve bu empedansın incelemesi yapılmıştır. Son yıllarda sayısal yöntemlerin çözümde bazı üstünlükler sağlaması nedeniyle transmisyon borusu geniş yüzeyi üzerine açılmış yarıklara da bu yöntemler uygulanmış ve iyi sonuçlar alınmıştır.

Boru üzerine açılan tek yarığın pratik uygulamalarda yetersiz kalması, boru üzerinde açılmış yarık dizilerinin önemini arttırmıştır. Bugün yarık dizilerinin polarizasyonlarının borunun uzanma yönünde olması nedeniyle radar antenlerinde, haberleşme antenlerinde ve ülkemiz için yeni bir konu olan mikrodalga enerjisinin endüstriyel uygulamalarında ışıma elemanı olarak sayısız uygulamaları bulunmaktadır. Bu kadar önemli bir görev üstlenmiş yarık dizilerinde, çok sayıda yarık ışıma yaptığından bunların her birinin ışıdıkları alanlar, dizideki diğer yarıklar üzerinde uzaklıkla değişen bir etki yapar. Yarığın açıklığındaki elektrik alan dağılımını etkileyen bu elektromanyetik etkileşim dizinin verimliliği üzerinde etkilidir. Yarıklar arasındaki bu elektromanyetik etkileşimin matematiksel ifadesi Elliott tarafından etkileşim katsayısı olarak verilmiştir.

4.2. Transmisyon Boruları Üzerine Açılan Yarıklar ve Işıma Özellikleri

Geometrik optikte, ışıkla aydınlatılan bir deliğin bir ekran üzerinde meydana getirdiği ışık alanı, deliğin karşıtı olan ve aynı boyutlardaki bir plakanın yarattığı ışık

alanının tamamlayıcısı olduğunu ifade eden Babinet prensibi, elektromanyetik alanların vektörel özelliği göz önüne alınarak H. G. Booker (1946) tarafından genelleştirilmesiyle, bir yarığın, aynı boyutta bir elektriksel dipole eşdeğer olduğu gösterilmiştir (Booker prensibi). Böylece bir yarığı, manyetik bir dipol olarak incelemek yapılan çalışmaları kolaylaştırmıştır.

Transmisyon borusu üzerine açılan yarıkların ışıması ilk defa W. H. Watson (1946) tarafından incelenmiştir. Boru üzerine açılan yarıklar teorisinin temelini teşkil eden, bu konudaki klasikleşmiş bir çalışma olan ve bugün çok sayıda çalışma için referans gösterilen "Theory of Slots in Rectangular Waveguides", A.F. Stevenson (1948) tarafından yapılmıştır. Stevenson, bu çalışmada yarıklar için transmisyon, hat analogisini geliştirerek, yansıma ve transmisyon katsayıları için detaylı formüller elde etmiş ve boruyu uyaran alana bağlı olan yarığın gerilimini vermiştir. Stevenson, bu çalışmayı yaparken, bugünde geçerli olan bazı kabuller yapmıştır. Bunlar,

1) Boru duvarlarının mükemmel iletken olduğu ve kalınlıklarının ihmal edildiği kabul edilir.

2) Yarığın boyutları,

$$2 \cdot \log_{10} \frac{w_y}{w_x} \gg 1 \quad (4.1)$$

w_y : yarık uzunluğu [cm]

w_x : yarık genişliği [cm]

şartını sağlar.

3) Boru dışındaki alan göz önüne alındığında, bu alanın, yarığı içeren yüzeyin arkasındaki bölgeye nüfuz etmediği kabul edilir.

4) Transmisyon borusunun TE_{10} modunda yayılım yaptığı ve yarıkların boyunun ilk rezonans boyu civarında olduğu kabul edilir.

Bu kabullerden ilk ikisi teori ile pratik uygulamalar arasında bir soruna neden olmamaktadır. Üçüncü kabul, teori ile pratik arasında büyük hatalara sebep olabilmektedir. Bazı deneysel araştırmalar neticesinde, yarığın bulunduğu düzlemin arka bölgesine alan dalmasının sıfır olmadığı görülmüştür. Dördüncü kabul, teorisinin gelişimi için olması tam zorunlu değildir. Fakat bu kabulün pratik önemi büyüktür. Bir çok çalışma bu kabulden bağımsızdır.

Daha sonra A. A. Olliner (1954), yarığın empedansı üzerinde çalışarak rezonans boyundaki yarığın empedansını yaklaşık bir formülle ifade etmiştir. B. N. Das (1974), yarığın üzerindeki elektrik alan dağılımını sinüzoidal kabul ederek, çift ve tek alan dağılımlarına göre, yarığın eşdeğer devresini incelemiş ve yarıktan ışılan kompleks güç ve boru içindeki düzensizlikteki mod gerilimlerini kullanarak seri yarığın empedansının boyu ile değişimini bulmuştur. H. Y. Yee (1974), yarığın transmisyon borusunun merkezinden olan uzaklığı da ilave ederek Olliner'in varyasyonel çözümünü geliştirmiştir.

Bilgisayar teknolojisinde gerek donanım gerekse yazılım alanında ortaya çıkan hızlı gelişmeler, yarıklar üzerine yapılan bu çalışmaların karmaşık olan matematiksel bağıntılarının sayısal yöntemlerle çözüm kolaylığını getirmiştir. Bu sayısal yöntemlerden yarığın için en çok kullanılanı Moment Yöntemidir. Bu yöntemle yapılan ilk çalışmalar, T. V. Khac'ın (1973) yarığın açıklığındaki sınır şartlarını kullanarak, yarığın açıklığındaki elektrik alan dağılımı için oluşturduğu integral denklemi, darbe açılımı (pulse expansion) ve nokta uydurmayı (point matching) seçerek Moment yöntemiyle çözmesiyle başlar. Daha sonraları açılım fonksiyonlarının sinüzoidal fonksiyonlar olarak seçilmesi ve moment metodundaki açılım fonksiyonu terim sayısının artmasıyla bulunan neticeler daha iyi sonuçlar vermiştir. L. G. Josefsson (1987), boyuna yarığın açıklığındaki alan için Galerkin tekniğine göre sinüzoidal açılım fonksiyonu seçerek boyuna yarığın admitans özelliklerini ve boru duvar kalınlığının etkileriyle birlikte incelemiştir.

Transmisyon borusu üzerinde tek yarığın kullanmak yerine yarıklar dizisi oluşturmak ve hatta üzerine yarıklar dizisi açılmış transmisyon borularının yan yana dizilmesiyle oluşan düzlemsel diziler kullanmak anten ve endüstriyel uygulamalarda avantajlar sağlamaktadır. Fakat bu şekilde oluşturulan dizilerde, dizi elemanlarının birbiriyle olan elektromanyetik etkileşimleri ortaya çıkmaktadır. R. S. Elliott (1978), boyuna yarıklar dizisinde bu etkileşmeyi karşılıklı admitans ile incelemiştir. Yine R. S. Elliott (1983), yarıklar dizisindeki bu elektromanyetik etkileşimleri, karşılıklı teoremini (reciprocity theorem) kullanarak etkileşim katsayısı (coupling coefficient) adı altında temel bir değişkenle ifade etmiştir. İki yarığın arasındaki etkileşim katsayısının yarıklar arası uzaklıkla değişimi ve etkileşim katsayısının rezonans boyu civarında Taylor serisine açılarak yarıkların boyları ile değişimi, G. Mazzarella ve G. Panariello (1987) tarafından incelenmiştir. S. R. Rengarajan (1992), etkileşim

katsayısını ilk defa eğimli yarıklara uygulamış ve yarığın açıklığındaki elektrik alanın genliğinde ve fazında etkileşimden dolayı oluşan hataları çıkarmıştır. Moment yönteminin yarık dizilerine uygulanması S. R. Rengarajan'ın boyuna ve eğimli yarıklar dizisinde bu yöntemi kullanmasıyla önemli derecede geliştirilmiştir.

Bugün yarıklar, radarlardan endüstriyel mikrodalga uygulayıcılarına kadar çok çeşitli yerlerde kullanılmaktadır. Bu nedenle de zaman ilerledikçe yeni çalışmalar bilim ve teknik dünyasında yerini almaktadır.

4.3. Transmisyon Borusunun Geniş Yüzeyi Üzerine Açılan Yarıklar

Yarıklarla gerçekleştirilen bir çok uygulamada, dikdörtgen transmisyon borusunun duvarlarından birisine yarığın açılmasıyla, besleme ve ışınma yapılan tek düzenekte birleştirilir.

Şekil 4.1'de görülen eksen takımının seçilmesiyle TE₁₀ modunun pozitif z yönünde ilerleyen normalize edilmiş H_z, H_x manyetik alan ve E_y elektrik alan bileşenleri,

$$H_z = j \cos \frac{\pi x}{a} e^{j(\omega t - \beta_{10} z)} \quad (4.2a)$$

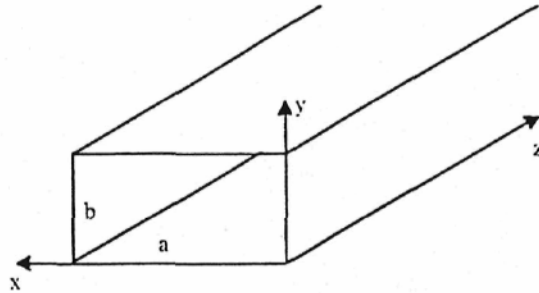
$$H_x = \frac{-\beta_{10}}{\pi / a} \sin \frac{\pi x}{a} e^{j(\omega t - \beta_{10} z)} \quad (4.2b)$$

$$E_y = \frac{\omega \mu_0}{\pi / a} \sin \frac{\pi x}{a} e^{j(\omega t - \beta_{10} z)} \quad (4.2c)$$

$\beta_{10} = 10$ modu için faz sabiti

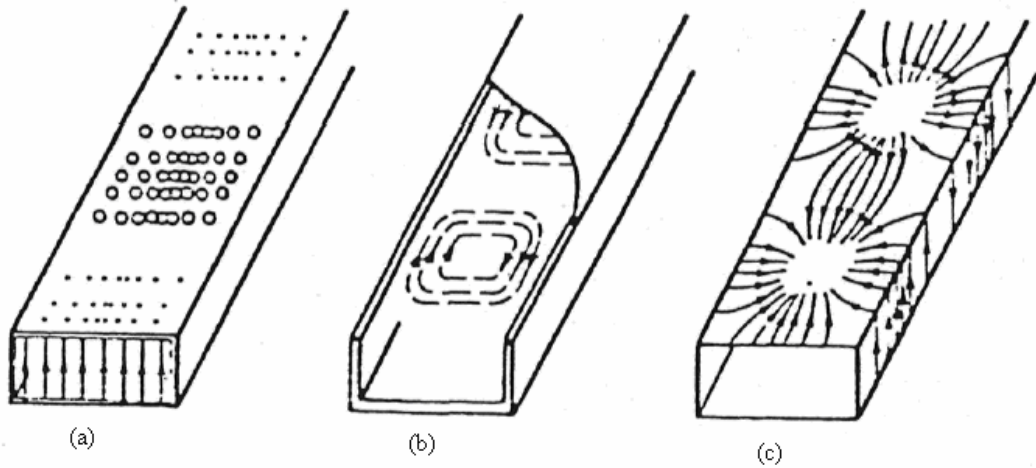
$\omega =$ açısal frekans (rad/s)

olarak bilinmektedirler (R. S. Elliott, 1981).



Şekil 4.1 : Dikdörtgen Transmisyon Borusu

Şekil 4.1'de verilen dikdörtgen transmisyon borusu, (4.2) eşitliğinde alan bileşenleri verilen TE_{10} modu ile uyarıldığında Şekil 4.2a'da görülen boru içerisindeki elektrik alan dağılımı ve Şekil 4.2b'de görülen manyetik alan dağılımı oluşur. Bu elektrik ve manyetik alan dağılımları, boruyu çevreleyen mükemmel iletken duvarlar üzerinde sınır şartları gereğince bir akım ve yük dağılımı oluştururlar. Transmisyon borusu duvarlarında sinüzoidal olarak değişen elektrik akım dağılımı, Şekil 4.2c'de görülmektedir. Bu dalga formu, TE_{10} 'in faz hızıyla boru boyunca hareket eder.

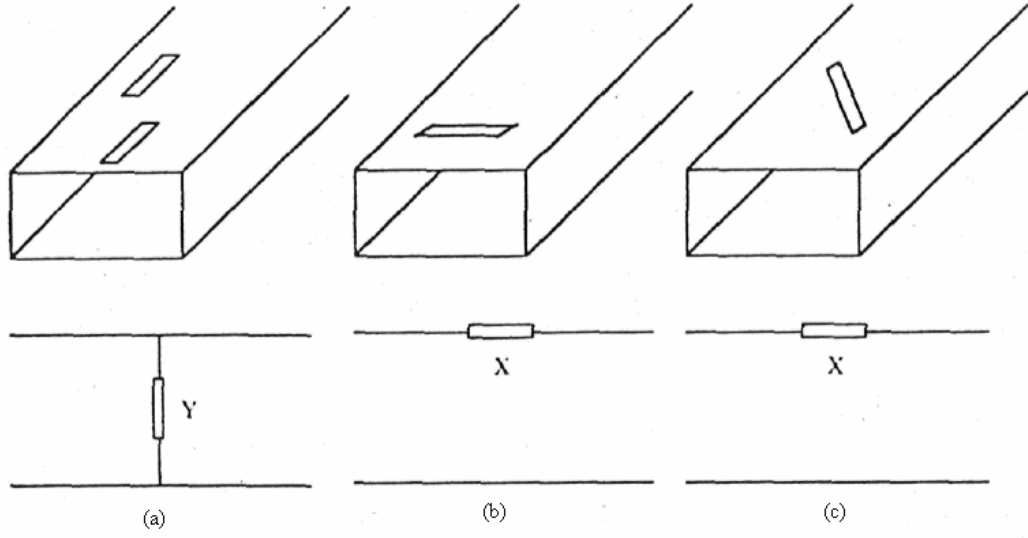


Şekil 4.2 : TE_{10} modunda dikdörtgen dalga kılavuzunda alan ve akım dağılımı. a) Dalga kılavuzu içerisinde elektrik alan dağılımı
b) Dalga kılavuzu içerisinde manyetik alan dağılımı
c) Dalga kılavuzu yüzeyinde oluşan elektrik akım dağılımı

Bir yarığın ışıma yapabilmesi için Şekil 4.2c'de verilen ve uyarıya moduna bağlı akım çizgilerini kesmesi gerekmektedir. Eğer dar yarığın, Şekil 4.3a'da görüldüğü gibi borunun geniş yüzeyine merkezden belli bir uzaklıkta açılmış ise bu, Şekil 4.2c'de görülen, x-yönündeki akım çizgilerini etkiler. Boru merkezinden olan uzaklık ne kadar fazla olursa yarığın akım çizgilerini etkilemesi artacaktır. Yarığın akım çizgilerinde meydana getirdiği x-yönündeki bozulma hatları kuramına göre bir şönt admittansa karşılık gelir. Bu yarığın, borunun yayılım yönü boyunca uzandığından boyuna yarığın veya şönt bir admittansa karşılık geldiğinden dolayı şönt yarığın adı alır. Boyuna yarığın, borunun geniş yüzeyinin tam merkezine açıldığı durumda akım çizgilerinin boru merkezinde sıfır olduğundan dolayı burada bir düzensizliğe yol açmaz ve ışıma yapmaz.

Şekil 4.3b ve c'de görülen yarıklar ise borunun, üst yüzeyinde oluşmuş akım çizgilerinin z-yönünde olanlarını etkilerler. Yarığın akım çizgilerinde meydana getirdiği z-yönündeki bozulma hatlar kuramına göre bir seri empedansa karşılık gelir. Şekil 4.3b'deki yarık, borunun eninde uzandığından dolayı enine yarık adını alır.

Şekil 4.3c'deki yarık ise boru yüzeyinde belli bir açı ile konumlandığından eğimli yarık adını alır. Bu yarıkların ikisine birden, seri yarık da denir.



Şekil 4.3 : Transmisyon borusunun geniş yüzeyine açılmış a) boyuna yarıklar b) enine yarıklar ve c) eğimli yarıklar ve eşdeğer devreleri.

Transmisyon borusunun geniş yüzeyinde oluşan akım çizgilerini kesen yarığın açıklığında bir elektrik alan dağılımı oluşur. Bu alan dağılımı, akım çizgilerini oluşturan, boruyu uyaran alanlara, yarığın boyuna ve boru yüzeyindeki konumuna bağlıdır. Yarığın açıklığındaki elektrik alan dağılımının dalga biçimi, yarık Booker prensibine göre bir elektriksel dipole eşdeğer kılındığından dipol üzerindeki alan dağılımına benzer olmalıdır yani yarığın uçlarında sıfır ve merkezinde maksimum olacak şekilde bir dağılım gösterir. Bunu da matematiksel olarak, sinüzoidal fonksiyonlar ile ifade etmemiz mümkündür.

Boruyu uyaran alanın fazına göre göreceli olarak tanımlanan yarığın açıklığındaki elektrik alanın fazı ise rezonans boyunda yarık boyunca her yönde eşit olarak dağılım gösterir ve değerini yarığın boru yüzeyinde kestiği akım çizgileri belirler. Şekil 4.3a'da görülen boyuna yarığın alan dağılımının fazı boru ekseninden olan uzaklığı pozitifse 90° , negatifse, x-yönündeki akım çizgileri yön değiştirdiğinde -90° olur.

Enine yarığın elektrik alanının fazı, z-yönündeki akım çizgileri, boru enince yön değiştirmedeğinden 0° veya 180° olur. Eğimli yarıқта ise konum açısı ve boru ekseninden olan uzaklığı değiştirilerek açıklığındaki alanın fazı 0° ile 360° derece arasında ayarlanabilir.

5. BİLGİSAYAR BENZETİM YAZILIMIYLA MİKRODALGA FIRIN TASARIMI

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilmek istenen mikrodalga fırının boyutlandırılmasında tasarım iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada rezonatör yokken dalga kılavuzu tasarımı yapılmıştır. İkinci aşamada ise rezonatör tasarlanmış ve dalga kılavuzuna uydurulmuştur.

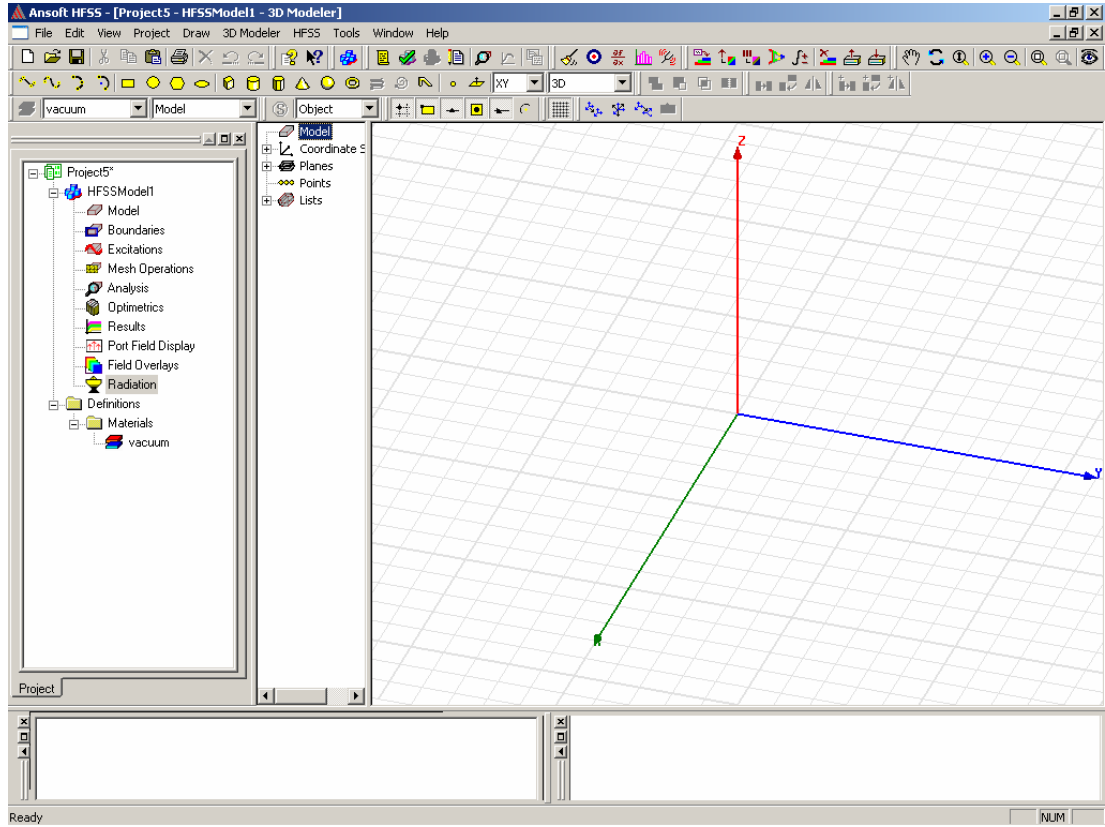
Tasarım, Ansoft firmasının, Türkçe “Yüksek Frekansta Yapı Benzetimi” programı olarak adlandırılabilir, HFSS (High Frequency Structure Simulator) paket programı ile yapılmıştır. Bu bölümde, tasarım sonucunda elde edilen kaynağa ait giriş yansıma katsayısı ve alan şiddetinin değişim grafiği gibi başarımlar parametreleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

5.1. Bilgisayar Programı

Tez kapsamındaki tasarım çalışmalarında, Amerikan Ansoft firması tarafından üretilen HFSS (High Frequency Structure Simulator) isimli bilgisayar paket programının 9.1 sürümü kullanılmıştır. Program, grafik tabanlı görsel arayüzlere sahiptir. Programda problemlerin çözümü, mühendisliğin pek çok alanında olduğu gibi elektromanyetik alan incelemelerinde de etkin olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, Laplace, Poisson, dalga denklemi gibi diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözen bir sayısal yöntemdir. Çözüm ilkesi, sınır veya başlangıç koşulları ile verilen söz konusu diferansiyel denklemin çözümü yerine, çözüm bölgesi içinde elektromanyetik enerjiyi minimum yapan çözümü bulmaktır. Yani yöntem, diferansiyel denklemin çözümünden bulunacak sonuç ile enerjiyi minimum yapan çözümden bulunacak sonuç aynıdır ilkesinden yararlanmakta ve ikinci yoldan problemi çözmektedir. Bu amaçla problemin tanımlandığı çözüm bölgesi, problemin boyutuna göre bir, iki veya üç boyutlu sonlu elemanlara bölünür ve her bir eleman içinde enerjiyi minimum yapacak şekilde, genelde sonlu elemanların uç veya köşe noktalarını oluşturan eleman düğüm noktalarındaki fiziksel büyüklükler hesaplanır. Daha sonra eleman

düğümüleri için elde edilen fiziksel büyüklerden problemin istenen çözüm büyüklükleri türetilir.

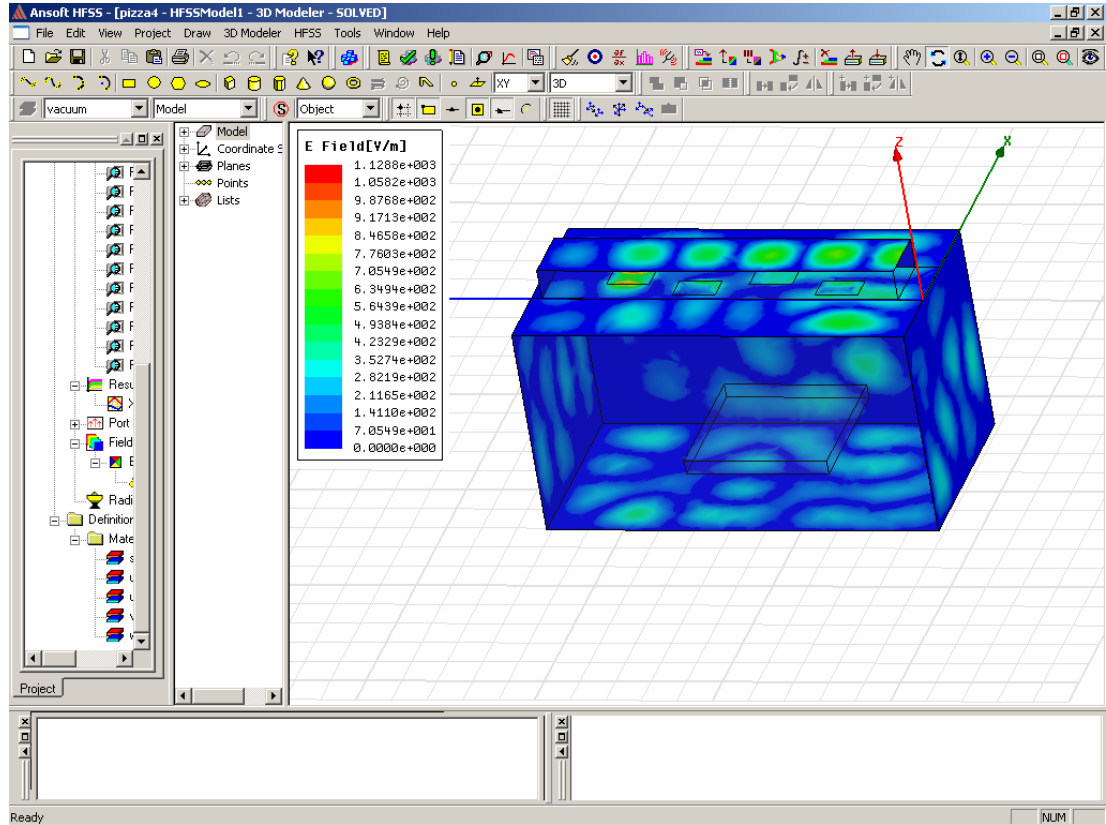
Programda bir benzetimin yapılabilmesi için, problemin geometrinin çizilmesi, sınır koşullarının belirtilmesi, kaynağın tanımlanması, problemin çözüm şeklinin belirlenmesi gerekmektedir. Uygun geometriyi çizebilmek için program içerisinde bulunan iki ve üç boyutlu şekillerden yararlanılır. Bu şekiller, birbirleriyle toplanarak veya çıkartılarak daha karmaşık geometrilerin şekilleri çizilir. İçinde çizilen şeklin de yer aldığı problemin çözüm bölgesinde elektromanyetik alan sınır koşulları ve problemin yapısında bulunan maddelerin elektromanyetik özellikleri programa verilmelidir. Daha sonra kaynağın yeri, şekli, polaritesi gibi değişkenler belirtilmelidir. Son olarak çözüm frekansı ve gerekiyorsa o frekans civarında oluşturulacak tarama tipi ve yakınsama durumları belirtilmelidir. Şekil 5.1'de programın ilk açılışında karşılaşılan ekran görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : HFSS programının açılış ekranı görüntüsü.

Söz konusu programda oluşturulan modelde dalga kılavuzu ve rezonatör, iki boyutlu şekiller olan dikdörtgenler yardımı ile üç boyutlu şekil haline getirilmiştir. Dalga

kılavuzunun eni 8.636 cm, yüksekliği 4.318 cm, uzunluğu 50 cm'dir. Yarık parametreleri dalga kılavuzundaki giriş yansıma katsayısını en küçük yapacak şekilde ve Bölüm 5.2'de belirtildiği gibi seçilmiştir. Rezonatör sınır koşulu olarak tüm yüzeyleri mükemmel iletken olarak alınmıştır. Kaynağın dalga kılavuzu, xy düzleminde tanımlanmıştır. Dalga kılavuzunun sonu kısa devredir. Çalışma frekansı olarak 2.45 GHz alınmıştır. Çözüm tipi olarak bir kaynak tarafından beslenen model seçilmiştir. Dalga kılavuzu içerisindeki alanların hesabı için üç adet tekrar seçilmiştir. Yukarıda belirtilen frekansın etrafında oluşacak değişimlerin hesabı için 2.4 GHz ve 2.5 GHz arası 0.01 GHz artımlarla çözüm taranmıştır. Belirtilen değişkenler ile elde edilen örnek bir alan dağılımı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

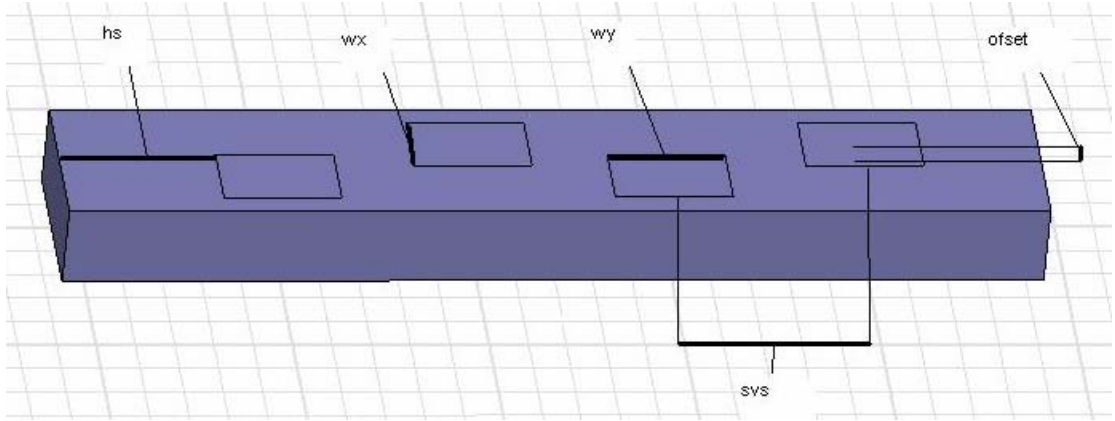


Şekil 5.2 : HFSS programı ile elde edilen, dalga kılavuzu ve rezonatörün içinde oluşan elektrik alan dağılımının görüntüsü

5.2. Dalga Kılavuzu Tasarımı

Mikrodalga enerjisinin ısınacak cisme aktarılacağı rezonatör yapısının mikrodalga enerjisiyle beslenebilmesi için rezonatöre uygun yapıda enerji çıkış düzeneği bulunan bir beslemeye ihtiyaç bulunmaktadır. Böyle bir yapı dikdörtgen kesitli bir dalga

kılavuzunun yayılım yönünde açılacak yarıklar ile gerçekleştirilebilir. Bu amaçla dalga kılavuzu tasarımı ilk olarak rezonatör bulunmaksızın uygun yarık yapısı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aşağıda belirlenen yarık parametreleri için giriş yansıma katsayısı (s11) minimum olacak şekilde iyileştirme aranmıştır.



Şekil 5.3 : HFSS programı aracılığıyla oluşturulan dalga kılavuzundaki yarıkların yapısı ve parametrelerin gösterimi

- ofset : Dalga kılavuzunun uzun kenarının ortasından yarığın ortasına kadar olan mesafe [cm]
wx : Yarığın genişliği [cm]
wy : Yarığın uzunluğu [cm]
hs : Yarık dizisinin dalga kılavuzunun sonundan uzaklığı [cm]
svs : Ardışık iki yarığın merkezleri arasındaki uzaklık [cm]

Belirlenen parametre değerlerinin birbirleri ile ve literatürdeki değerlerle karşılaştırılması Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablo 5.1’de belirtilen sonuçlar, Şekil 5.3’te gösterilen beş değişkenin her birinin değiştirilirken diğerlerinin sabit tutulması durumuna göre bulunmuştur. Değiştirilecek değişken “**HFSS>Design Properties**” tablosunda işaretlenmiş, daha sonra “**HFSS>Optimetrics Analysis>Add parametric**” seçenekleri ile çıkan formda değişkenin seçilmesi; başlangıç ve bitiş değerleri ve adım uzunluklarının belirlenmesi, son olarak da çizilecek grafikte y ekseninde bulunması istenilen değişkenin “**Calculations**” sekmesine yazılmasıyla tamamlanır. Y ekseninde bulunacak değer tüm hesaplamalarda s11 parametresinin büyüklüğünün karesi yani güç olarak alınmıştır. Yukarıda belirtilen beş değişken için bulunan analiz sonuçları aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 5.1 : Dalga kılavuzu tasarımında en iyi giriş yansımaya katsayısını veren değerler ve bu değerlerin değişiminin -10 dB' deki band genişliği ve giriş yansımaya katsayısına etkileri

	Elde edilen en iyi sonuçlar											
	ofset			wx		wy		hs		svs		
ofset (cm)	1.35	1.3	1.4	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
wx (cm)	3.6	3.6	3.6	3.5	3.7	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
wy (cm)	6	6	6	6	6	5	7	6	6	6	6	6
hs (cm)	8	8	8	8	8	8	8	7	9	8	8	8
svs (cm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	11	11
Band Genişliği @ -10 dB (MHz)	190	175	190	180	190	-	145	180	185	170	135	135
Max dB	-47	-35	-30.5	-36	-35.5	-8.25	-26	-28	-25	-27.5	-13.75	-13.75
Max dB @ f (GHz)	2.45	2.46	2.44	-2.45	2.45	2.47	2.48	2.48	2.42	2.57	2.6	2.6

Elde edilen sonuçların Compton, (1988) tarafından bulunan teorik değerlerle tam olarak örtüşmediği görülmektedir. Teorik olarak yarığın genişliği ve yarık dizisinin dalga kılavuzunun sonundan uzaklığı,

$$wy = \frac{\lambda_g}{2} \quad (5.1)$$

$$hs = \frac{\lambda_g}{4} \quad (5.2)$$

olur. Bu bağıntılarda λ_g , cm cinsinden dalga kılavuzu içerisindeki dalga boyudur. Bu dalga boyu

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (5.3)$$

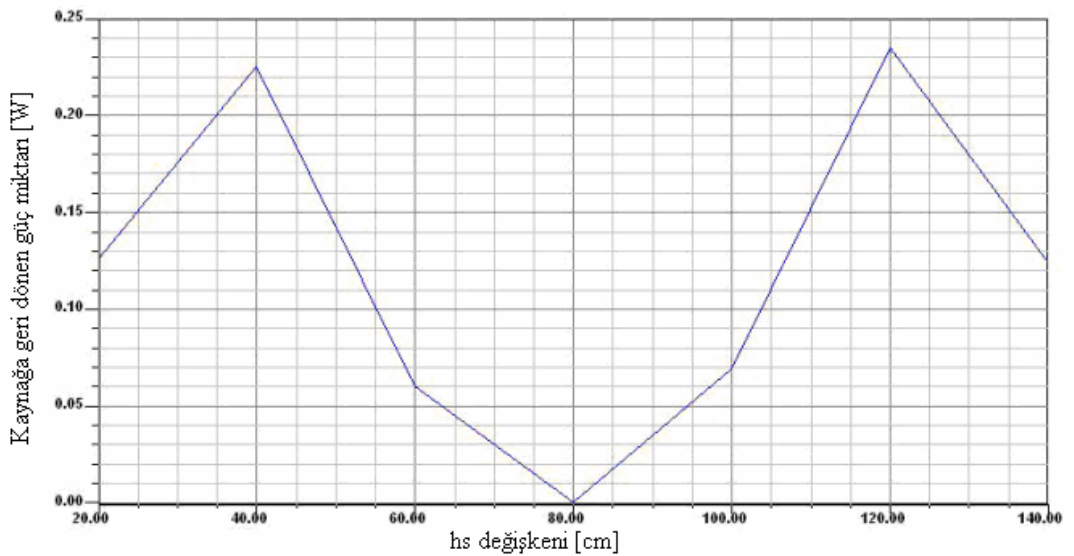
formülü ile ifade edilir. Burada

λ : Serbest uzaydaki dalganın dalga boyu [cm]

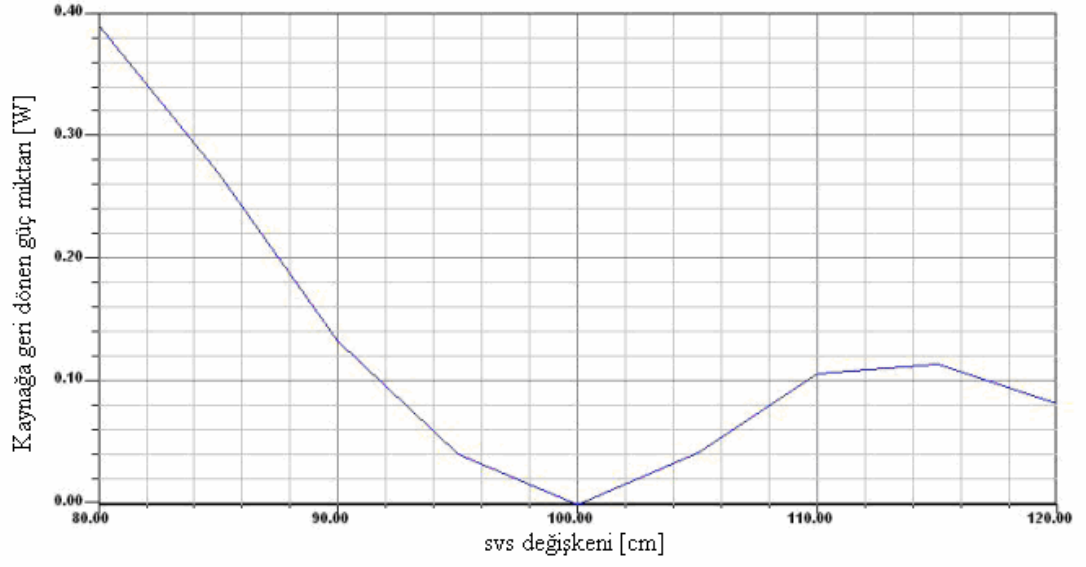
f_c : Kesim frekansı [Hz]

f : Çalışılan frekans [Hz]

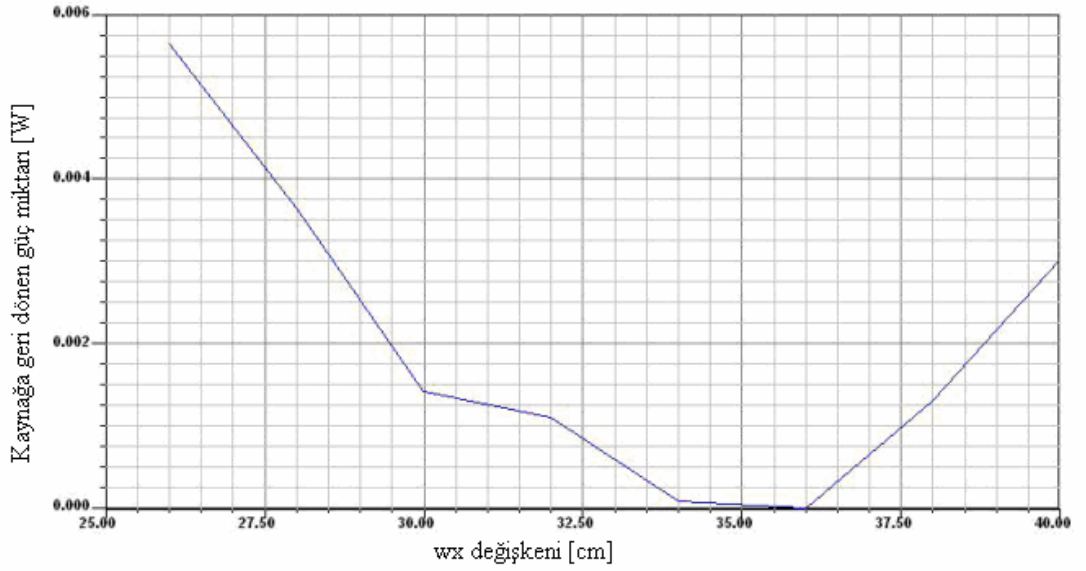
belirtir. (5.3) ifadesine göre $\lambda_g = 17.14$ cm bulunmuştur. Bu koşullar altında $wy = 8.57$ cm ve $hs = 4.285$ cm olarak belirlenir. Ancak bu teorik değerler bilgisayar benzetim programıyla elde edilen değerlere eşit değildir.



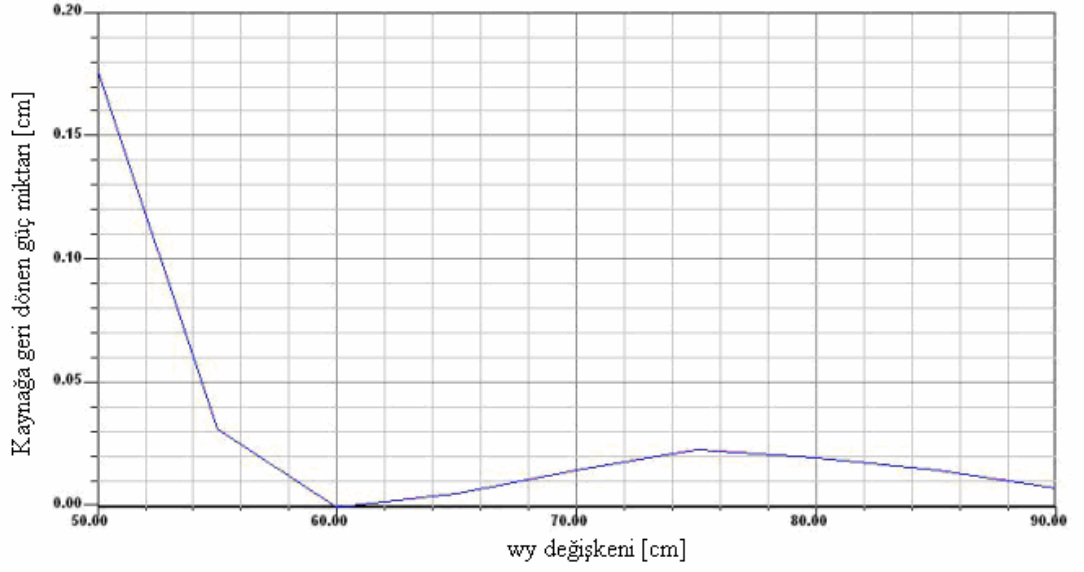
Şekil 5.4 : hs değışkeninin değışimiyle kaynağa geri dönen gücün ilişkisi



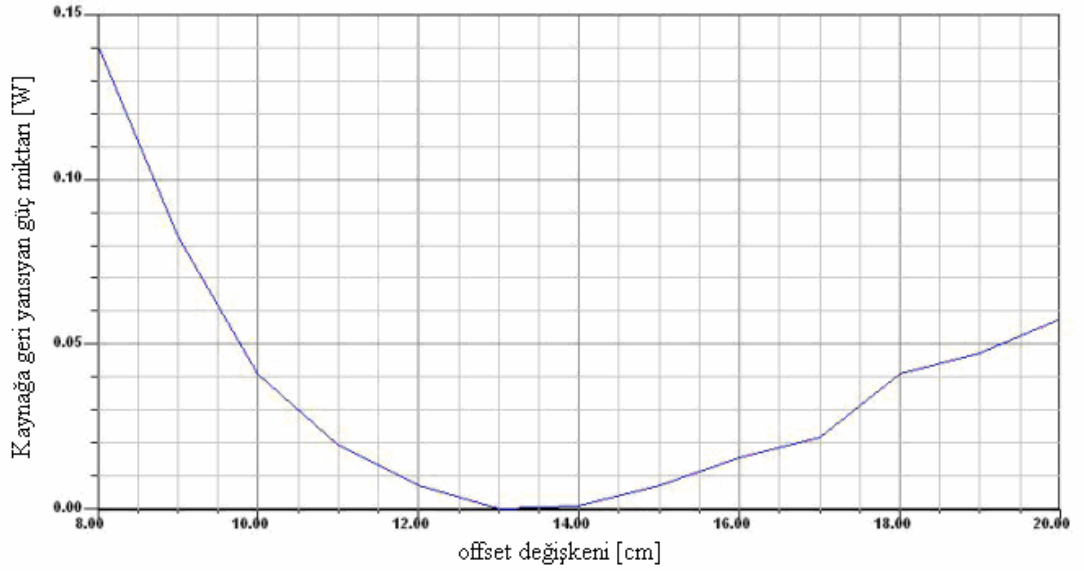
Şekil 5.5 : svş değışkeninin değışimiyle kaynağa geri dđnen gđcđn ilişkisi



Şekil 5.6 : wx değışkeninin değışimiyle kaynağa geri dđnen gđcđn ilişkisi

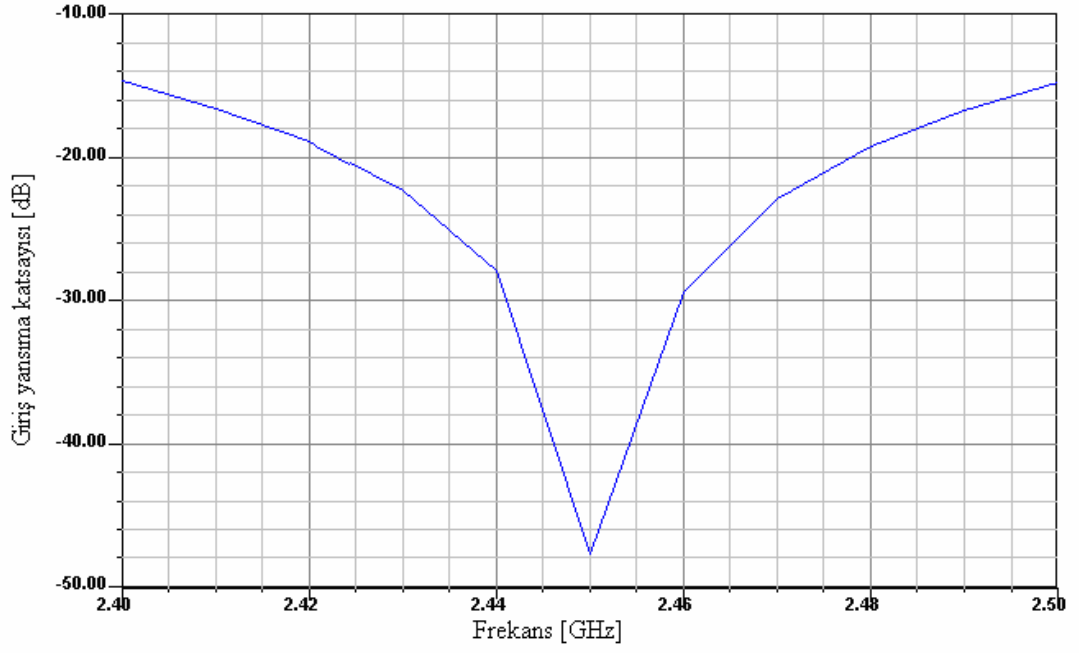


Şekil 5.7 : wy değişkeninin değişimiyle kaynağa geri dönen gücün ilişkisi



Şekil 5.8 : ofset değişkeninin değişimiyle kaynağa geri dönen gücün ilişkisi

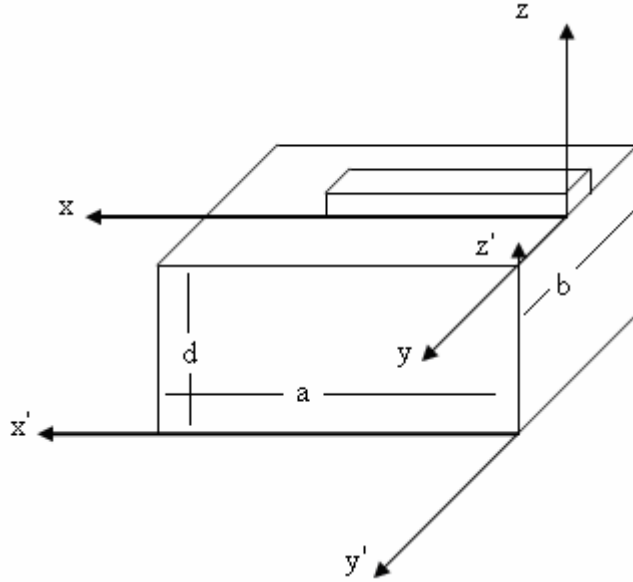
Yukarıda belirtilen hesaplamalar sonucunda dalga kılavuzunun giriş yansımaya katsayısını minimum yapan ofset = 1.35 cm, $w_x = 3.6$ cm, $w_y = 6$ cm, $h_s = 8$ cm, $s_v s = 10$ cm değerleri bulunmuş ve giriş yansımaya katsayısı grafiği çizilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 : Giriş yansımaya katsayısını en küçük yapan değişkenler ile hazırlanan dalga kılavuzunun giriş yansımaya katsayısı grafiği

5.3. Rezonatör'ün Tasarımı

Bu bölümde rezonatörün tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar açıklanmıştır. Şekil 5.10'da rezonatör ve göz önüne alınan boyut parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 5.10 : Dalga kılavuzu ve altına yerleştirilmiş rezonatörün görüntüsü

İkinci bölümde belirtilen dalga kılavuzuna uygun rezonatörün tasarlanabilmesi için, rezonatör için aşağıda belirtilen kısıtlayıcı koşulların sağlanması gereklidir:

1) Rezonatörün boyu dalga kılavuzunun boyundan küçük olamaz

$$2) f_{r_{m,n,p}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (5.3)$$

Bu bağıntıda

m : a doğrultusunda rezonatör içerisinde oluşan mod

n : b doğrultusunda rezonatör içerisinde oluşan mod

p : d doğrultusunda rezonatör içerisinde oluşan mod

a : rezonatörün uzunluğu [m]

b : rezonatörün genişliği [m]

d : rezonatörün yüksekliği [m]

$f_{r_{m,n,p}}$: m,n,p modu için rezonans frekansı [Hz]

μ : manyetik geçirgenlik (N/A²)

ε : dielektrik katsayısı (F/m)

göstermektedir. Bu bağıntıya (Karnel, 1998) göre rezonans frekansı, dalga kılavuzunu besleyen 2.45 GHz'e eşit olmalıdır.

3) Şekilde belirtilen koordinat sistemi için

$$E_z = E_0 \sin\left(\frac{n\pi x'}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y'}{b}\right) \cos\left(\frac{q\pi z'}{d}\right) \quad (5.4)$$

formülü ile doğru orantılıdır (Karnel, 1998).

$\sin\left(\frac{n\pi x'}{a}\right)$ in 0 ile 1 arasında n adet tepe noktası

$\cos\left(\frac{q\pi z'}{d}\right)$ in 0 ile 1 arasında m-1 adet tepe noktası olduğu hatırlanırsa;

dalga kılavuzunun x eksenine yönünde dört adet yarığı olduğu için, rezonatörün de x eksenine üzerinde dört adet yarığının olması dalga kılavuzundan rezonatör içerisine girecek enerjiyi maksimum yapacaktır. Bunun için n değişkeni en küçük dört seçilmelidir.

4) y ekseninde boyunda oluşacak tepelerin tek olması simetri açısından önemlidir. Aksi takdirde rezonatörü beslemek için birden fazla dalga kılavuzu olmalıdır. Dolayısıyla m tek sayı olmalıdır.

5) Rezonatörün yüksekliği boyunca tepe noktalarını belirleyen q'nun da m ve n gibi mümkün olduğu kadar küçük seçilmesi gerekmektedir. Böylece elektrik alan değerini sıfır yapan nokta sayıları azalacak bu da enerjinin daha homojen dağılmasını mümkün kılmaktadır.

Yukarıda belirtilen koşullara göre seçilecek rezonatör boyutları ve nmq modu, ikinci koşulda verilen rezonans frekansını sağlaması gerekir.

Rezonatörün boyunu 55 cm, genişliğini 30 cm, yüksekliğini 30 cm seçersek 2.45 GHz de herhangi bir çözüm bulunmamaktadır. En yakın çözümler 2.434684 GHz'de 623 modu ve 2.471741 GHz'de 541 modudur ki geçerli çözümler değildir.

Rezonatörün boyunu 55 cm, genişliğini 29 cm, yüksekliğini 30 cm seçersek 2.45 GHz de herhangi bir çözüm bulunmamaktadır. En yakın çözümler 2.449049 GHz'de 623 modu ve 2.466887 GHz'de 632 modudur ki geçerli çözümler değildir.

Rezonatörün boyunu 55 cm, genişliğini 28 cm, yüksekliğini 30 cm seçersek 2.45 GHz e yakın olarak 2.454178 GHz de 433 modu bulunmaktadır. Ayrık ama çok sayıda olan çözümlerden ısıtılacak cismin hacimlerine uygun bir tanesi seçilebilir.

Benzer şekilde, rezonatörün boyunu 40 cm, genişliğini 36.7 cm, yüksekliğini 30 cm seçersek 2.45 GHz frekansında 433 modu bulunmaktadır.

Bu mod rezonatörün boyuna uzunluğunda 4'ü ve enine uzunluğunda tek sayıyı sağladığı ve düşük modlardan oluştuğu için iyi bir çözümdür.

Şimdi de rezonans frekansını tam 2.45 GHz yapmak için 433 modunu ve rezonatörün boy ve genişliğini sabit tutarak yüksekliğini ayarlayalım, yani

$$2.45 \cdot 10^9 = \frac{\sqrt{\left(\frac{4}{0.55}\right)^2 + \left(\frac{3}{0.28}\right)^2 + \left(\frac{3}{d}\right)^2}}{1.5 \cdot 10^8}$$

yazalım. Bu durumda bu bağıntıdan $d = 30.14$ cm bulunur.

Elektrik alanın z bileşeninin normalize z eksenine boyunca $\cos \frac{3\pi z'}{d}$ nin taban ($z = 0$) ve tavan ($z = d$) dışında 2 adet tepe noktası vardır, dolayısıyla bu noktalar $z = -10.04$ ve $z = -20.09$ noktalarıdır. Bu noktalar, yüke en fazla miktarda enerjinin verilebileceği yüksekliklerdir. Dolayısıyla yüke en fazla ısı transferi için, yük tepe noktalarından birine yerleştirilmelidir (Plants, 1991).

Yukarıda verilen rezonatör ve dalga kılavuzu parametrelerine göre oluşturulan benzetimde, yük olarak eni ve boyu 10 cm x 10 cm, 15 cm x 15 cm ve 20 cm x 20 cm boyutlarında ve her biri 2 cm yüksekliğinde olan hamurlar kullanılmıştır.

Rezonatörün boş olması durumunda kaynaktan verilen tüm enerjinin hesaplama uzayından geri yansımaları sonucunda giriş yansıma katsayısının en kötü olduğu bir değere ulaşmaktadır. Başarımın izlenmesi için rezonatörün içerisine iletkenliği bulunan yükün kullanılması şarttır aksi durumda kaynaktan çıkan dalgalar dalga kılavuzunda ilerleyip rezonatörden geri yansımaktadır.

Örnek olarak kullanılan hamurun elektriksel özellikleri HFSS v9.2'nin içerisinde bulunan "mikrodalga ısıtma" örneğinden alınmıştır.

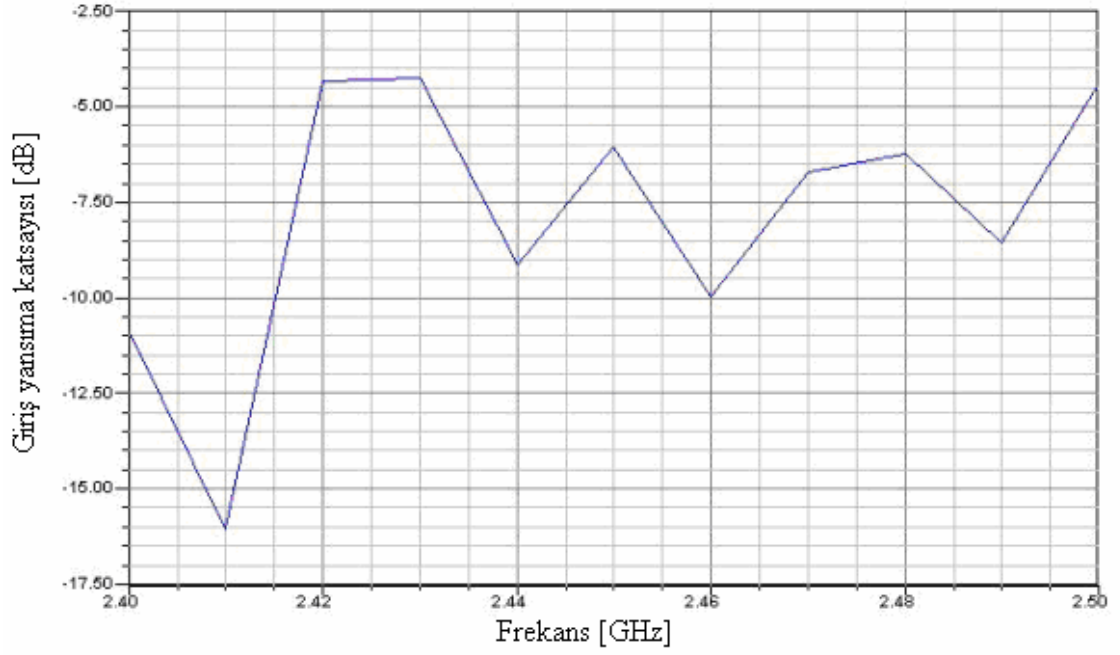
Bağıl dielektrik sabiti : 6

Bağıl manyetik geçirgenlik : 1

Elektriksel iletkenlik : 0 Siemens/m

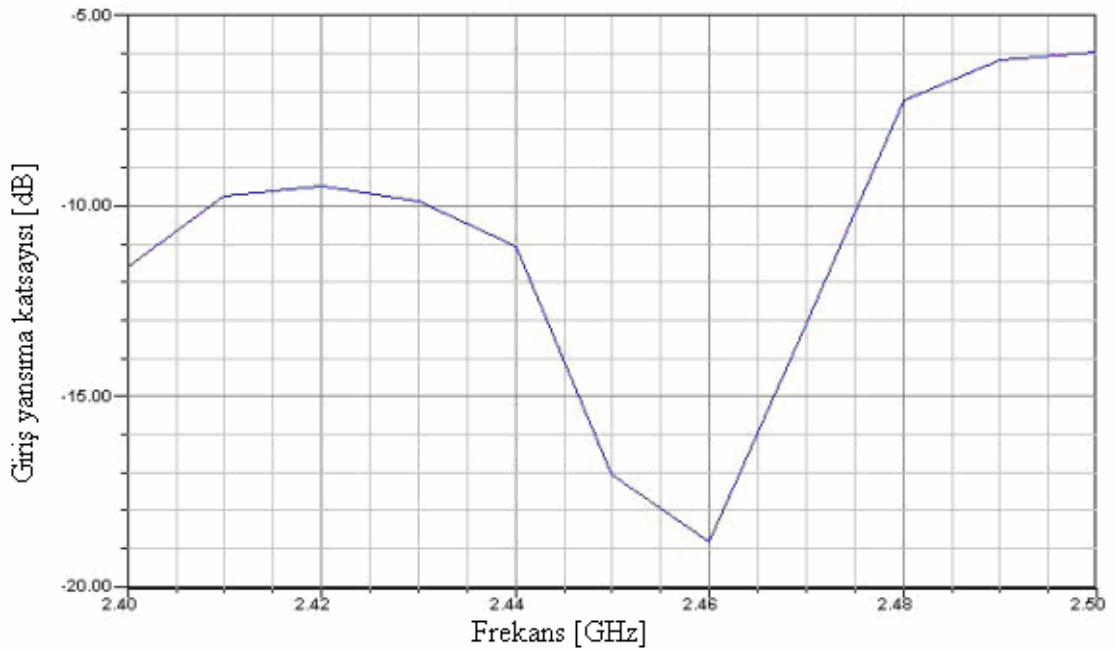
Dielektrik kayıp tanjantı : 0.5

Bu koşullar altında 10 cm x 10 cm x 2 cm boyutlarındaki yük ile sistemin giriş yansıma katsayısı grafiği şekilde 5.11'de verilmiştir.



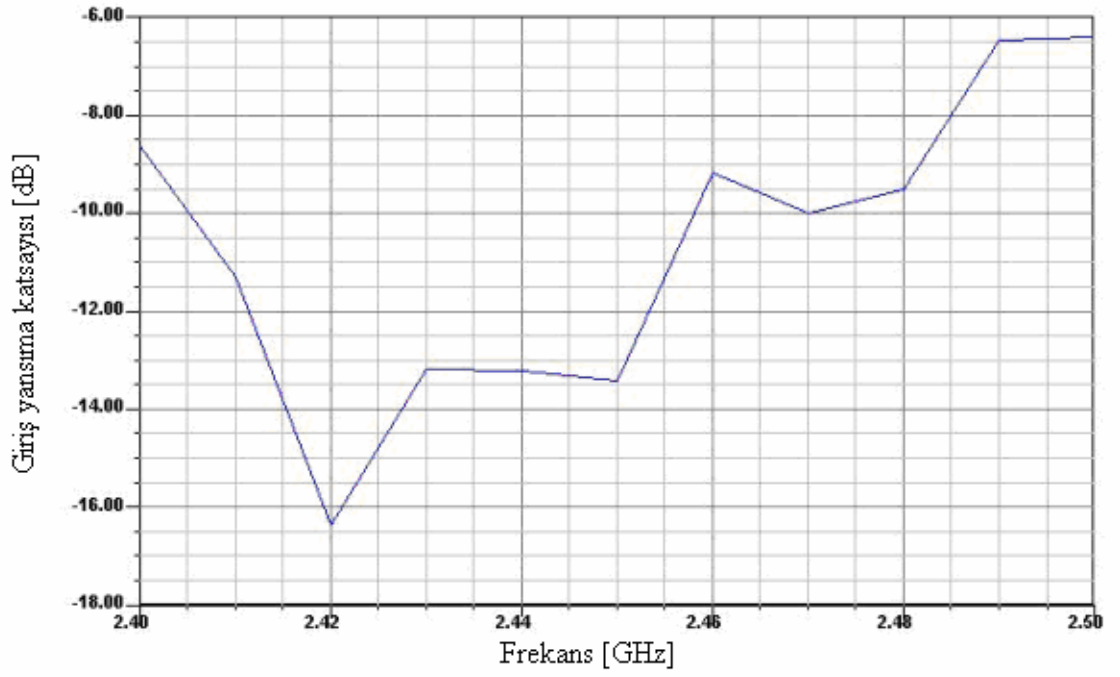
Şekil 5.11 : Rezonatörün içindeki yük 10 cm x 10 cm x 2 cm boyutlarında iken giriş yansımaya katsayısının frekans ile değişim grafiği

Yükün 15 cm x 15 cm x 2 cm olması durumunda sistemin giriş yansımaya katsayısı grafiği şekilde 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12 : Rezonatör’ün içindeki yük 15 cm x 15 cm x 2 cm boyutlarında iken giriş yansımaya katsayısının frekans ile değişim grafiği

Yükün 20 cm x 20 cm x 2 cm olması durumunda sistemin giriş yansımaya katsayısı grafiği şekilde 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13 : Rezonatörün içindeki yük 20 cm x 20 cm x 2 cm boyutlarında iken giriş yansımaya katsayısının frekans ile değişim grafiği

SONUÇLAR

Bu çalışmada mükemmel iletken dikdörtgen rezonatör yapısını besleyebilecek dört yarıkli anten tasarımı üzerinde durulmuştur. Çalışılacak frekans belli olduğunda ve yarıklar arasındaki mesafe dalga kılavuzu içerisindeki dalga boyu ile ilgili olduğundan, rezonatörün boyunun en küçük değeri bu değişkenlere bağlıdır. Rezonatörün mümkün olan en küçük değerden ne kadar büyük olacağını ise ısıtılmak istenen malzemenin boyutları belirler.

Yarık anten tasarımının bir uygulaması da mikrodalga fırındır. Mikrodalga fırında dalga kılavuzunu besleyen bir kaynak bulunmakta ve bu kaynaktan çıkan enerji kılavuz içerisinde ilerleyerek yarıklardan çıkıp rezonatörün içerisine ışın yapmaktadır. Dolayısıyla bu ışın sonucu enerji fırın içerisindeki yüke iletilmiş olur.

Yayılan alanları hesaplamak için moment metodu, sonlu elemanlar yöntemi gibi birçok sayısal yöntem kullanılmaktadır (Kai, 1989). Bu tezde kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemine dayanarak hesap yapan Ansoft firmasının geliştirdiği HFSS adlı paket program olmuştur. Bu programın avantajları; yapılan uygulamalarda elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar verebilmesi ve Windows tabanlı ara yüze sahip olmasıdır.

Çalışmada ilk olarak dalga kılavuzu rezonatör yokken tasarlanmış ve yarıkları açılmıştır. Daha sonra dalga kılavuzu parametreleri giriş yansıma katsayısını en aza indirecek şekilde diğerleri sabit tutulurken biri değiştirilerek en iyi değişkenler kümesi elde edilmiştir. Bu küme ile giriş yansıma katsayısı -48 dB olarak bulunmuştur. Daha sonra çalışılan frekans (2.45 GHz) ve ev kullanımı için makul fırın ölçüleri seçilerek rezonatörün boyutları hesaplanmış ve en uygun rezonans modu seçilmiştir. En uygun rezonans modunu veren birden çok rezonatörün boyutlar kümesi elde edilebilir. Seçilen bu modda yükün boyutlarına bağlı olarak değişen yaklaşık 50 MHz band genişliği ve -10 dB den daha az giriş yansıma katsayısı elde edilmiştir. Bu da kaynaktan çıkarak dalga kılavuzu içerisinde ilerleyip, yarıklardan rezonatör içerisine giren enerjini yüke ulaşarak ısınmasına sebep olduğunu gösterir.

Bu tez içerisinde yapılan sayısal örneğe ek olarak; yarık dalga kılavuzundaki yarık sayısının değişiminin, dalga kılavuzu ve rezonatörden oluşan sistemin giriş yansımaya katsayısına etkisi, rezonatör ve dalga kılavuzunun kayıplı olması durumu, yük olarak fırın içerisine konan cismin özelliklerine göre sistemin giriş yansımaya katsayısının araştırılması gibi konular üzerinde çalışılabilir.

KAYNAKLAR

A) Kitap ve Kitap Bölümleri

- Balanis, C. A.**, 1983. Antenna Theory Analysis and Design. John Wiley and Sons, New York.
- Chang K.**, 1989. Handbook of Microwave and Optical Components, Vol. 1, John Wiley and Sons, New York.
- Collin, R. E. ve Zucker F. J.**,1985. Antenna Theory. McGraw Hill, New York.
- Compton, R. T.**, 1988. Antenna Theory. Prentice-Hall, New Jersey.
- Elliott, R. S.**, 1981. Antenna Theory and Design. Prentice-Hall, New Jersey.
- Jordan, E. C. ve Balmain, K. G.**, 1974. Electromagnetic Waves and Radiating Systems. Prentice-Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey.
- Karnel, R. P., Colef D. G., Camisa L. R.**, 1998. Introduction to Electromagnetic and Microwave Engineering. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Plants, J.**, 1991. Microwave Ovens. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.

B) Süreli Dergilerdeki Makaleler

- Elliott, R. S. ve Kurtz, L. A.**, 1978. The Design of Small Slot Array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **26**, 2.
- Elliott, R. S. ve O'loughlin, W. R.**, 1986. The Design of Slot Arrays Including Internal Mutual Coupling. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **34**, 9.
- Josefsson, L. G.**, 1987. Analysis of Longitudinal Slots in Rectangular Waveguides. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **35**, 12.
- Khae, T. V. ve Carson, C. T.**, 1973. Impedance Properties of Longitudal Slot Antenna in the Broad face of a Rectangular Waveguide. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 708-710.
- Mazzarella, G. ve Panariello, G.**, 1987. On the Evaluation of Mutual Coupling Between Slots. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **35**, 11.
- Rengarajan, S. R. ve Gabrelian, E.**, 1992. Efficient and Accurate Evaluation of External Mutual Coupling Between Compound Broad Wall Slots. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **40**, 733-737.
- Stevenson, A. F.**, 1948. Theory of Slots in Rectangular Waveguides. Journal of Applied Physics, **19**, 24-38

Yee, H. Y., 1974. Impedance of a Narrow Longitudinal Shunt Slot in a Slotted Waveguide Array. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 589-592.

C) Akademik Konferanslarda Sunulan Bildiriler

Yakovlev V. V., 2001. Examination of Contemporary Electromagnetic Software Capable of Modeling Problems of Microwave Heating, *8th AMPERE Conference on Microwave & High Frequency Heating*, Bayreuth, Germany, September 3-7.

Yee B., 1995. Slot Antenna Design. *40th Annual West Coast VHF / UHF Conference*, May 5-7, Cerritos CA, California, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Hakkı Yavuz Akagün, 22.08.1977 tarihinde İstanbul'da doğmuştur. 1996 yılında Adana Anadolu Lisesi'ni bitirmiş ve İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'ne girmiştir. Ankara'da, Aselsan'da ve Marconi Telekomünikasyon A.Ş.'de staj yapmıştır. 2001 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'na girmiştir. İlgili alanları arasında mikrodalgalar, antenler, dalga kılavuzları, uydu ve sayısal haberleşme bulunmaktadır.